

ANALYSE DU CYCLE DE VIE ET RECOMMANDATIONS CONCERNANT LA  
VALORISATION DES PALES D'ÉOLIENNES DANS L'EST-DU-QUÉBEC

Par Pierre-Olivier Bédard

Essai présenté en vue de l'obtention du double diplôme  
Maîtrise en environnement  
Master en Ingénierie et Management de l'Environnement et du Développement Durable  
(M. Env. - IMEDD)

Sous la direction de Mourad Ben Amor

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE (Québec, Canada)

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE TROYES (France)

Septembre 2018

## SOMMAIRE

Mots-clés : éolienne, valorisation, analyse du cycle de vie, énergie renouvelable, pale, économie circulaire, matériaux composites, enfouissement, béton, incinération

L'objectif principal de ce projet final de maîtrise est d'évaluer le portrait environnemental en lien avec le recyclage des pales d'éoliennes dans l'Est-du-Québec. Plus précisément, elle vise à mesurer la performance environnementale de différents scénarios de traitement en fin de vie, à évaluer si les distances de transport influencent de manière significative leurs performances environnementales et à proposer des recommandations pour la mise en valeur des pales.

Un portrait de l'industrie éolienne de l'Est-du-Québec démontre le besoin de gérer plus de 20 000 tonnes de pales, soit le volume estimé présentement en service et qui devra être traité dans un horizon de 20 à 25 ans. L'état des connaissances permet de recenser les principales techniques de traitement. Les pales actuelles sont composées en majorité de fibre de verre. La plupart des procédés ne sont pas matures technologiquement et encore moins économiquement. La fibre de verre résiduelle ne possède aucune valeur commerciale en raison de la perte de propriétés mécaniques importantes qu'entraînent les procédés de traitement et d'une valeur calorifique sous les standards de l'industrie pour la récupération d'énergie. Pour ces raisons, bien que les pales ne soient pas l'élément avec le plus grand impact au niveau du cycle de vie d'une éolienne complète, la gestion de pales en fin de vie représente la plus grande incertitude.

En 2018, les pales sont envoyées directement au lieu d'enfouissement technique le plus près. Dans le cadre de cette étude, trois scénarios sont élaborés pour faire l'objet d'une analyse du cycle de vie comparative. Il s'agit de l'enfouissement, de la valorisation dans le béton, sous la forme d'un agrégat fin substituant le sable, et l'incinération en cimenterie, en utilisant les pales comme carburant alternatif pour remplacer en partie le charbon. L'évaluation est faite avec le logiciel SimaPro et la méthode de calcul IMPACT 2002+. Les résultats montrent que le scénario de valorisation dans le béton est le plus bénéfique pour les catégories de dommages de la santé humaine et des changements climatiques. L'incinération en cimenterie limite le mieux l'épuisement des ressources. Les distances de transport sont un paramètre clé de l'étude. La distance maximale de transport pour avoir un bénéfice au niveau des changements climatiques par rapport à l'enfouissement est de 1696 kilomètres pour la valorisation dans le béton et de 906 kilomètres pour l'incinération en cimenterie. Les prochaines années pourraient voir des avancées technologiques dans le domaine du recyclage de la fibre de verre qui ne sont pas évaluées dans cette étude. Selon les résultats, il est recommandé de favoriser les méthodes de traitement avec le moins d'étapes possibles et qui substituent une matière avec un impact environnemental élevé.

## **REMERCIEMENTS**

Ce projet de fin d'études a été possible grâce à la collaboration de plusieurs intervenants qui y ont chacun apporté une valeur ajoutée indéniable.

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur d'essai, le professeur Mourad Ben Amor, d'avoir accepté de m'encadrer. Son expertise et sa disponibilité ont été d'un grand support. Par le fait même, cela s'applique aussi Laboratoire interdisciplinaire de recherche en ingénierie durable et écoconception (LIRIDE) pour m'avoir alloué une licence du logiciel d'analyse du cycle de vie SimaPro (Version Faculty 8.5.0.0).

Un grand merci à toute l'équipe du Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTÉI). Non seulement pour le support financier, par le biais de leur bourse annuelle sur le thème de l'écologie industrielle et de l'économie circulaire, mais aussi pour m'avoir accueilli à plusieurs reprises dans leurs locaux et la disponibilité de l'équipe pour répondre à mes questions.

Le projet a aussi été réalisé en collaboration avec Synergie Matanie, membre du réseau Synergie Québec. Le travail de M. Luc Massicotte a permis de faire le lien entre la théorie et la pratique grâce à ses nombreux contacts dans les industries de l'Est-du-Québec.

Finalement, sur une note plus personnelle, je tiens à remercier mes parents, Claire et Claude, pour m'avoir supporté tout au long de mon parcours. Merci !

## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
1. MISE EN CONTEXTE.....	3
1.1 Importance de l'éolien dans l'économie de l'Est-du-Québec.....	3
1.2 Présentation de l'économie circulaire.....	4
1.3 Taux de recyclage typique d'une éolienne complète et problématique des pales.....	4
2. REVUE DE LITTÉRATURE.....	8
2.1 Résultats d'ACV concernant une éolienne complète.....	8
2.1.1 Contribution des phases du cycle de vie.....	10
2.1.2 Contribution des composantes.....	10
2.2 Description des pales d'éoliennes.....	12
2.3 Durée de vie et cause de remplacement des pales.....	13
3. PROCESSUS DE GESTION DES PALES EN FIN DE VIE.....	15
3.1 Prévention et réemploi.....	15
3.2 Réutilisation.....	16
3.3 Recyclage.....	17
3.4 Processus mécaniques.....	17
3.5 Processus thermiques et thermochimiques.....	18
3.5.1 Pyrolyse.....	19
3.5.2 Processus thermochimiques.....	19
3.5.3 Incinération en cimenterie.....	20
3.6 Enfouissement.....	20
3.7 Sommaire des techniques de traitement des composites.....	21
4. DÉFINITION DES OBJECTIFS ET CHAMPS DE L'ÉTUDE.....	22
4.1 Objectifs de l'étude et application envisagée.....	22
4.2 Description des filières de gestion de fin de vie à l'étude.....	22
4.2.1 Collecte.....	23
4.2.2 Scénario 1 : Enfouissement.....	24
4.2.3 Passage au centre de tri.....	24
4.2.4 Scénario 2 : Valorisation dans le béton.....	25
4.2.5 Scénario 3 : Incinération en cimenterie.....	26
4.3 Fonctions et unité fonctionnelle.....	26
4.4 Champs de l'étude.....	29
4.5 Frontières géographique et temporelle.....	30
5. INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE (ICV).....	31
5.1 Sources de l'inventaire utilisé.....	31

5.2 Analyse des flux de matières des scénarios .....	31
5.2.1 Analyse des flux de matières du scénario 2 .....	31
5.2.2 Analyse des flux de matières du scénario 3 .....	33
5.3 Évaluation des distances de transport .....	33
5.4 Méthode d'évaluation des impacts environnementaux et indicateurs.....	34
6. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	36
6.1 Valorisation dans le béton.....	36
6.2 Incinération en cimenterie.....	38
6.3 Comparaison des scénarios .....	39
6.3.1 Impacts intermédiaires .....	40
6.3.2 Catégories de dommages.....	41
6.4 Analyse de sensibilité.....	41
6.4.1 Selon la méthode de calcul.....	41
6.4.2 Modification des distances de transport.....	43
6.4.3 Modification du métal sélectionné .....	43
6.4.4 Produit substitué pour le scénario 2 .....	44
7. LIMITES DE L'ÉTUDE.....	46
8. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES .....	49
8.1 Recommandations pour améliorer la gestion en fin de vie des pales éolienne .....	49
8.2 Perspectives .....	51
CONCLUSION .....	52
RÉFÉRENCES.....	54
BIBLIOGRAPHIE .....	59
ANNEXE 1 — LISTE DES PARCS ÉOLIENS EN SERVICE AU QUÉBEC.....	60
ANNEXE 2 — ANALYSE DE CONTRIBUTION .....	65
ANNEXE 3 — ANALYSE DE SENSIBILITÉ SELON LA MÉTHODE TRACI.....	67

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Représentation des phases du cycle de vie dans l'économie linéaire .....	5
Figure 1.2	Carte des parcs éoliens au Québec.....	6
Figure 2.1	Représentation des phases du cycle de vie d'un produit .....	8
Figure 2.2	Phases de l'ACV selon ISO 14 040 .....	9
Figure 2.3	Contribution environnementale des étapes du cycle de vie des éoliennes .....	11
Figure 2.4	Évaluation de l'impact environnemental et des incertitudes .....	12
Figure 2.5	Coupe transversale de l'intérieur d'une pale .....	13
Figure 3.1	Hierarchie de traitement des déchets .....	15
Figure 3.2	Exemple de réemploi dans l'Est-du-Québec .....	16
Figure 3.3	Méthodes de traitement des matériaux composites .....	17
Figure 4.1	Pelle mécanique équipée d'une cisaille .....	23
Figure 4.2	Déchiqueteuse à bois .....	24
Figure 4.3	Produit du déchiquetage des pales.....	25
Figure 4.4	Extension des frontières des scénarios .....	28
Figure 4.5	Frontières des systèmes .....	29
Figure 5.1	Analyse des flux de matières du scénario 2.....	33
Figure 5.2	Analyse des flux de matières du scénario 3.....	33
Figure 5.3	Méthode de calcul IMPACT 2002+ V.2.14 .....	35
Figure 6.1	Catégories de dommages pour la valorisation dans le béton .....	38
Figure 6.2	Catégories de dommages pour l'incinération en cimenterie.....	39
Figure 6.3	Comparaison des scénarios selon les impacts intermédiaires.....	40
Figure 6.4	Comparaison des scénarios selon les catégories de dommages potentiels .....	41
Figure 6.5	Comparaison des scénarios selon la méthode de calcul TRACI 2.1 .....	42
Figure 6.6	Comparaison des scénarios avec les distances de transport minimales.....	43
Figure 6.7	Comparaison des scénarios avec modification de l'acier .....	44
Figure 6.8	Comparaison de la valorisation dans le béton selon les processus évités.....	45
Tableau 1.1	Estimations des masses des principales composantes d'une éolienne de 2 MW .....	6
Tableau 2.1	Composition d'une pale éolienne.....	12
Tableau 4.1	Fonctions secondaires des scénarios .....	27
Tableau 5.1	Principales sources des données de l'inventaire .....	32
Tableau 5.2	Distances (en kilomètres) entre les parcs éoliens et les lieux de traitement potentiels...	34
Tableau 6.1	Étapes du cycle de vie de la phase de fin de vie .....	36
Tableau 6.2	Analyse de contribution pour la valorisation dans le béton .....	37
Tableau 6.3	Analyse de contribution pour l'incinération en cimenterie .....	39

Tableau 7.1	Contrôle de la qualité des données selon le bilan énergétique et de CO <sub>2</sub> .....	46
Tableau 7.2	Critères d'évaluation de la qualité des données .....	47
Tableau 7.3	Évaluation qualitative de la qualité des données.....	48
Tableau 8.1	Classification des méthodes de traitement en fin de vie des pales .....	50
Tableau 8.2	Distances maximales pour éviter l'enfouissement (en kilomètres).....	50

## LISTE ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

\$	Dollar canadien
¢/kWh	Cent par kilowattheure
ACV	Analyse du cycle de vie
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France)
CanWEA	Association canadienne de l'énergie éolienne
CGPME	Confédération générale des petites et moyennes entreprises (France)
CIRAIG	Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
CSA	Association canadienne de normalisation
CTTÉI	Centre de transfert technologique en écologie industrielle
CUFE	Centre universitaire de formation en environnement et en développement durable
gCO <sub>2eq</sub> /MJ	Gramme de dioxyde de carbone équivalent par mégajoule
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
ICV	Inventaire de cycle de vie
Institut EDDEC	Institut de l'environnement, du développement durable et de l'économie circulaire
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
LET	Lieu d'enfouissement technique
LIRIDE	Laboratoire interdisciplinaire de recherche en ingénierie durable et écoconception
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
MJ/kg	Mégajoule par kilogramme
MRC	Municipalité régionale de comté
MW	Mégawatt
PIB	Produit intérieur brut
PM <sub>2.5</sub>	Particules fines
RICQ	Regroupement des Industries des Composites du Québec
SAAQ	Société de l'assurance automobile du Québec
SADC	Sociétés d'aide au développement des collectivités



## LEXIQUE

Écologie industrielle	Ensemble de stratégies inspirées des cycles naturels basées sur le bouclage des flux de matières et d'énergie permettant aux entreprises et organisations d'optimiser l'utilisation des ressources (Centre de transfert technologique en écologie industrielle [CTTÉI], 2018).
Économie circulaire	Système de production, d'échange et de consommation visant à optimiser l'utilisation des ressources à toutes les étapes du cycle de vie d'un bien ou d'un service, dans une logique circulaire, tout en réduisant l'empreinte environnementale et en contribuant au bien-être des individus et des collectivités (Institut de l'environnement, du développement durable et de l'économie circulaire [Institut EDDEC], 2018).
Région désignée	Région regroupant la région de la Gaspésie–Îles-de-la-Madeleines et la MRC de la Matanie qui a émergé d'une volonté du gouvernement provincial de développer cette filière avec une expertise unique au Québec (TechnoCentre éolien, 2018).

## INTRODUCTION

Le vent est une ressource renouvelable disponible partout sur la planète. L'éolien est reconnu comme l'un des moyens de production d'électricité les plus respectueux de l'environnement. Cependant, la phase de démantèlement représente un flou concernant les impacts environnementaux de l'énergie éolienne. Au Québec, les premiers parcs éoliens ont été mis en service à Matane et Cap-Chat en 1998 et en 1999 (TechnoCentre éolien, 2018). Cela signifie que ceux-ci commenceront à atteindre la fin de leurs vies utiles à partir de 2020. Cette estimation considère une utilisation pour une période 20 ans, les pales étant remplacée en raison de l'usure et des avancées technologiques dans le domaine (Larsen et Sønderberg Petersen, 2014). Des questions se posent à propos du traitement des matières résiduelles associées à ces équipements, particulièrement celles des pales. En effet, ces dernières sont composées approximativement de 75 % de fibre de verre, ce qui complique leur valorisation (Mishnaevsky et al., 2017). Actuellement, ces matières se retrouvent au dépotoir ou bien sont incinérées pour récupérer de la chaleur (Vestas Wind Systems A/S, 2006). Synergie Matanie s'intéresse particulièrement à la question. Cet organisme est initiative du réseau des Sociétés d'aide au développement de la collectivité (SADC), de RECYC-QUÉBEC, de la ville de Matane et de la municipalité régionale de comté (MRC) de la Matanie. Le territoire comporte de nombreux acteurs industriels, comme des manufacturiers de composantes d'éoliennes, des producteurs de béton et une cimenterie. À cet égard, il existe des opportunités pour boucler des flux localement.

L'objectif principal de ce projet est d'évaluer les bénéfices environnementaux en lien avec la valorisation des pales d'éoliennes dans une démarche d'économie circulaire dans l'Est-du-Québec. Pour l'atteindre, plusieurs objectifs spécifiques seront accomplis. Tout d'abord, un portrait de l'industrie éolienne au Québec sera établi. Par la suite, un état des connaissances sera produit concernant les méthodes de recyclage des matériaux composites au niveau mondial. Un diagnostic sera posé en effectuant une analyse du cycle de vie (ACV) comparative de différents scénarios de traitement en fin de vie des pales d'éoliennes. Enfin, des recommandations seront formulées au niveau des débouchés pour la mise en valeur des pales dans le contexte de l'Est-du-Québec.

Trois critères d'évaluations ont été considérés pour assurer la qualité des sources utilisées dans cette étude. Il est question de l'actualité de la source, de l'objectivité des auteurs et de la fiabilité. Le premier met l'emphasis sur les données les plus à jour possible, seulement les sources publiées dans les 15 dernières années sont considérées. Dans le deuxième cas, lorsqu'une publication démontre un biais de l'auteur, une source qui propose un regard opposé est présentée. Le troisième critère a été appliqué au niveau des recherches dans les ouvrages de référence et les périodiques spécialisés. Les banques de données telles que *Scopus* et *Environmental Science and Pollution Management*, ont été utilisées en

priorité. Celles-ci permettent de vérifier le nombre de citations des sources et ainsi, une indication sur la crédibilité de ces dernières.

La démarche est un peu différente pour les données nécessaires à l'ACV en tant que telle. Pour assurer que l'étude soit représentative du contexte régional, des efforts ont été réalisés pour obtenir le plus d'information primaire possible auprès des industries de l'Est-du-Québec. Les données manquantes ont été recueillies de façon secondaire, par le biais de recherches bibliographiques dans la littérature, des publications gouvernementales et la banque de données Ecoinvent version 3.4. Cette dernière est la plus à jour de la base de données élaborée en Suisse et reconnue mondialement (Ecoinvent Association, 2017).

Cet essai est divisé en huit chapitres distincts. La mise en contexte permet de situer le lecteur par rapport à l'industrie éolienne qui est très importante dans l'Est-du-Québec. Une introduction à l'économie circulaire et une présentation de la problématique du traitement des pales à l'égard des autres composantes sont également présentées à cette étape. La revue de littérature présente des résultats d'ACV réalisées dans le passé concernant les impacts potentiels des éoliennes complètes sur l'environnement. Le chapitre suivant dresse un état des connaissances actuelles sur le recyclage des matériaux composites et des impacts des éoliennes. Par la suite, quatre chapitres présentent les phases d'une ACV selon les normes de l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) 14 040 et 14 044. C'est-à-dire la définition des objectifs et la portée de l'étude, l'inventaire de cycle de vie (ICV), l'évaluation des impacts environnementaux associés au système et l'interprétation de ces impacts potentiels. Finalement, des recommandations sont présentées dans le dernier chapitre. Celles-ci tiennent compte du contexte local de l'étude et incorporent les éléments de l'ACV. Des pistes concernant les recherches futures sont aussi formulées.

## **1. MISE EN CONTEXTE**

La mise en contexte présente un portrait de l'industrie éolienne de l'Est-du-Québec. La notion d'économie circulaire est ensuite présentée. Puis, la problématique du recyclage des pales est exposée par rapport aux autres composantes de l'éolienne.

### **1.1 Importance de l'éolien dans l'économie de l'Est-du-Québec**

L'Est-du-Québec est le berceau de l'énergie éolienne au Québec. En 1998, le premier projet de parc éolien, le Nordais, a été mis en service à Matane et à Cap-Chat. Ensuite en 2003, une « région désignée » a été créée après le premier appel d'offres d'Hydro-Québec. Cette région, regroupant la région de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleines et la MRC de la Matanie, a émergé d'une volonté du gouvernement provincial de développer cette filière avec une expertise unique (TechnoCentre éolien, 2018). En 2016, huit milliards de dollars avaient déjà été investis dans le développement de parcs éoliens au Québec. Les conditions dans les appels d'offres contraignent les investisseurs à dépenser dans la province. Un minimum de 30 % du coût des éoliennes doit être déboursé dans la région désignée de la MRC de la Matanie et de la région de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles [MERN], 2016).

Le secteur éolien est devenu un pilier de l'économie de la Gaspésie. Cette région a historiquement eu des difficultés économiques, avec taux de chômage moyen au cours de cinq dernières années étant de 14,6 % comparativement à la moyenne provinciale de 7,22 % (Institut de la statistique du Québec, 2018). Les retombées économiques de ces contraintes dans les appels d'offres d'Hydro-Québec ont été appréciables. Des manufacturiers d'envergure internationale, comme Marmen et LM Wind Power, se sont installés dans la région et y fabriquent diverses composantes, dont des tours et des pales. Des acteurs économiques de plusieurs types, comme des firmes de conseils et un institut de recherche, s'y sont installés pour créer un riche écosystème autour des activités de cette industrie. Aujourd'hui, le secteur emploie près de 1200 personnes dans la région désignée pour une puissance totale de 1167 MW (TechnoCentre éolien, 2018). Une étude sur les retombées économiques de l'industrie éolienne québécoise réalisée en 2013 indique que 20 emplois par année sont soutenus pour chaque MW de puissance éolienne installé, principalement pour la construction des sites et la chaîne d'approvisionnement qui en découle (SECOR-KPMG, 2013).

Le développement durable se définit comme celui « qui prend en compte le caractère indissociable des dimensions environnementale, sociale et économique des activités de développement » (Bureau de normalisation du Québec, 2011). Dans le cas de la croissance de l'industrie éolienne au Québec, le gouvernement a tenu compte de l'aspect social en ciblant une région dans le besoin à l'aide de contraintes dans les appels d'offres. De plus, un sondage mandaté par l'Association canadienne de

l'énergie éolienne (CanWEA) en 2017 indique que 78 % des Québécois sont plutôt favorable à l'éolien (Léger, 2017). Ainsi, l'acceptabilité sociale est bonne pour cette industrie dans la province. Il reste maintenant à voir si la gestion en fin de vie de ces équipements, un des derniers points d'interrogation de cette technologie, répond à la dimension environnementale. Ce critère est d'autant plus important, car parmi les Québécois favorables à l'éolien, 70 % le sont pour des raisons écologiques (Léger, 2017).

## **1.2 Présentation de l'économie circulaire**

Ce projet s'inscrit dans un mouvement de transition vers une économie circulaire. L'économie linéaire traditionnelle n'est pas durable dans une optique où elle entraîne une surconsommation des ressources à l'entrée du système et du gaspillage, de la pollution et des déchets à la sortie. Plusieurs définitions et interprétations de l'économie circulaire existent de nos jours. De telle sorte qu'il n'existe pas de consensus international à l'heure actuelle. Il est possible de la définir comme un :

« système de production, d'échange et de consommation visant à optimiser l'utilisation des ressources à toutes les étapes du cycle de vie d'un bien ou d'un service, dans une logique circulaire, tout en réduisant l'empreinte environnementale et en contribuant au bien-être des individus et des collectivités. » (Institut de l'environnement, du développement durable et de l'économie circulaire [Institut EDDEC], 2018)

De ce fait, elle s'appuie sur quatre piliers pour atténuer les carences de l'économie linéaire. La figure 1.1 les présente en fonction du moment où ils interviennent dans le cycle de vie d'un produit. Elle a été élaborée par l'Institut de l'environnement, du développement durable et de l'économie circulaire (Institut EDDEC) et RECYC-QUÉBEC. Ainsi, il est possible de remarquer que le terme économie circulaire englobe une quantité appréciable de concepts différents. Le plus important à comprendre pour cette étude est l'écologie industrielle. Elle peut être définie comme un « ensemble de stratégies inspirées des cycles naturels basées sur le bouclage des flux de matières et d'énergie permettant aux entreprises et organisations d'optimiser l'utilisation des ressources » (Centre de transfert technologique en écologie industrielle [CTTÉI], 2018). En somme, le flux des pales d'éoliennes en fin de vie reste encore à boucler.

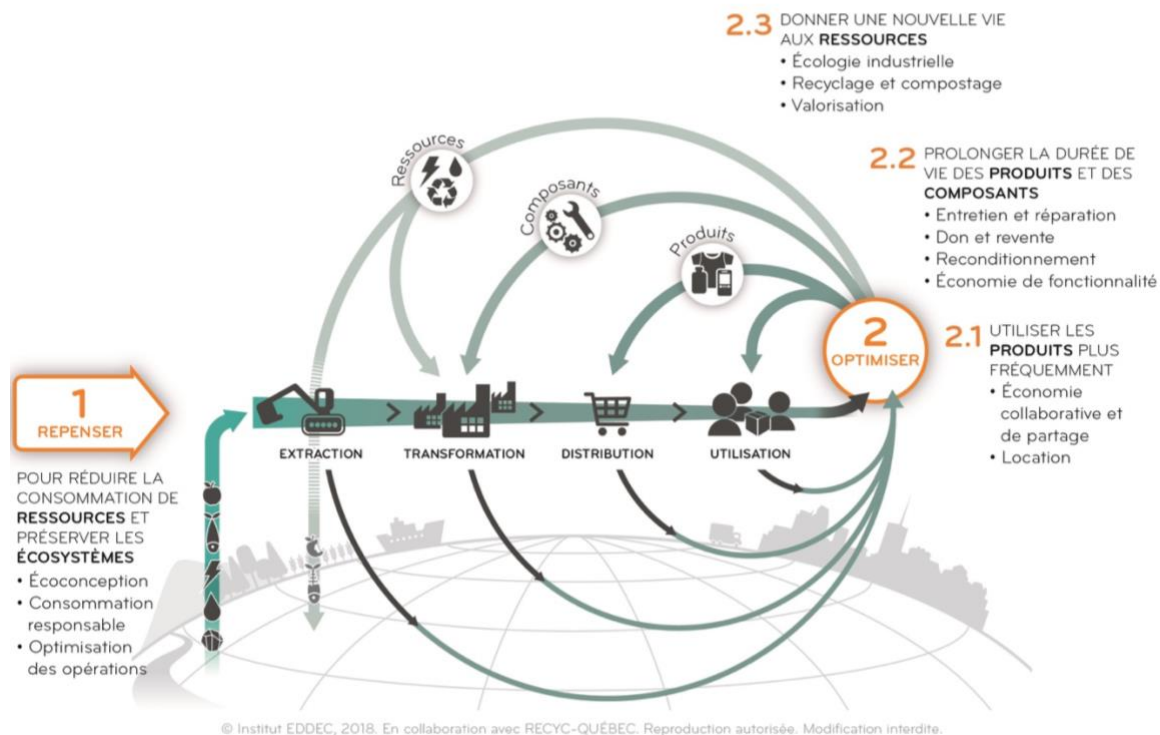
L'économie circulaire est particulièrement efficace pour revitaliser une économie en déclin, car elle permet de créer de la richesse en considérant les déchets comme des ressources et de faire émerger de nouveaux modèles d'affaires plus respectueux de l'environnement (RECYC-QUÉBEC, 2018).

## **1.3 Taux de recyclage typique d'une éolienne complète et problématique des pales**

En date du 16 novembre 2017, il y avait 1861 turbines en service au Québec pour une capacité totale de 3504,6 MW (TechnoCentre éolien, 2018). Les capacités unitaires varient entre 750 kW pour les plus anciennes et s'élèvent jusqu'à 3,2 MW pour les plus récentes. Les éoliennes de 1,5 MW, installées entre

2006 et 2012, sont les modèles les plus répandus avec 545 unités représentant 29,3 % des unités installées pour 23,3 % de la capacité (TechnoCentre éolien, 2018).

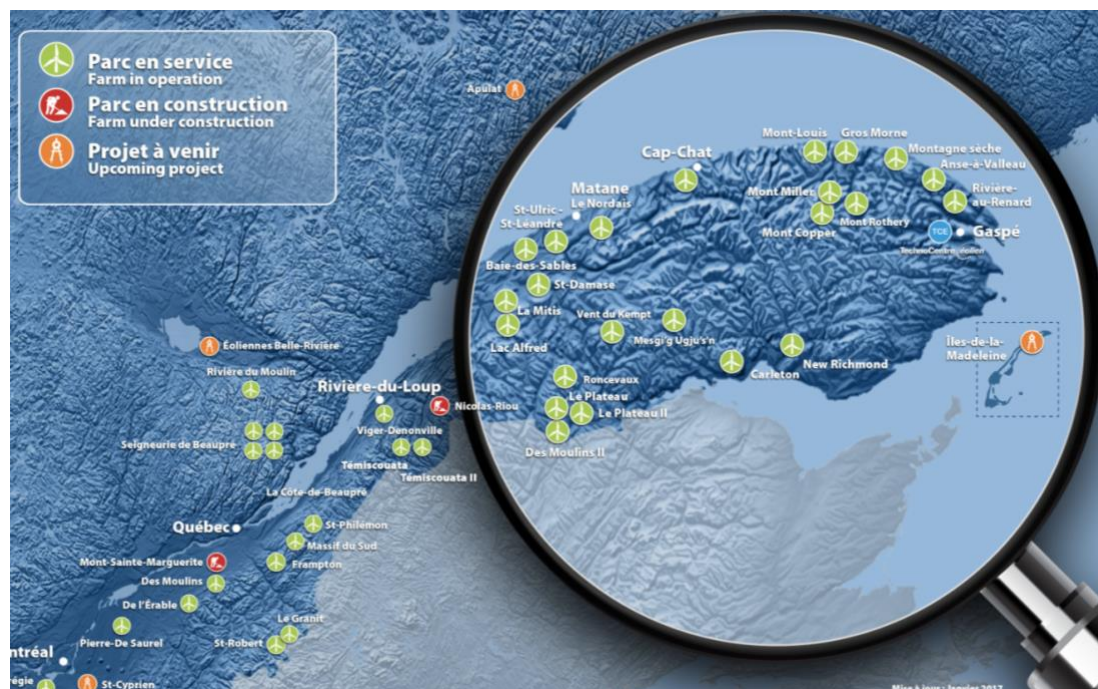
## L'économie circulaire



**Figure 1.1 Représentation des phases du cycle de vie dans l'économie linéaire** (tiré de : Institut EDDEC, 2018)

Les éoliennes de 2,05 MW suivent ensuite de près, installées entre 2010 et 2016, 515 unités sont en service pour une proportion de 27,7 %, mais elles représentent la capacité de production la plus importante avec 1055 MW (TechnoCentre éolien, 2018). Quant à eux, les autres modèles d'éoliennes sont présents, mais en quantité moins significative. La figure 1.2 présente les parcs éoliens actuellement en service au Québec et délimite grossièrement la région désignée, qui se trouve à l'intérieur de la loupe. Un tableau qui présente une liste exhaustive des parcs en opération au Québec est disponible à l'annexe 1.

Selon une ACV réalisée en 2009, la masse des pales d'une éolienne de 2 MW est de 19,5 tonnes (Martinez, Sanz, Pellegrini, Jiménez et Blanco, 2009). Donc, il est possible d'estimer qu'une pale pèse environ 6,5 tonnes pour une éolienne de cette capacité. Le tableau 1.1 présente la masse des principales composantes d'une éolienne de 2 MW. Les pales représentent 9 % du poids total de l'éolienne, mais près du quart des coûts des composantes (Martinez et al., 2009 ; European Wind Energy Association [EWEA], 2009).



**Figure 1.2** Carte des parcs éoliens au Québec (tiré de : TechnoCentre éolien, 2018)

Il est à noter que le poids varie non seulement en fonction de la capacité, mais aussi de la fabrication. Pour les éoliennes installées sur le territoire de la région désignée, le poids unitaire peut varier entre 5 et 16 tonnes (Liu et Barlow, 2015). La longueur des pales d'une éolienne de 1,5 MW est de 30 à 35 mètres (TechnoCentre éolien, 2018). La composition des pales sera présentée plus en détail dans les sections suivantes. Le recyclage de la fibre de verre entraîne une perte des propriétés mécaniques de celle-ci (Wind Europe, 2017). De plus, les investissements importants et les coûts des procédés de recyclage signifient que la fibre de verre récupérée coûte plus cher que la fibre neuve, ce qui limite les initiatives de l'industrie (Larsen et Sønnderberg Petersen, 2014). Somme toute, la valeur ajoutée au niveau économique du détournement de cette matière est d'éviter, ou bien de réduire au minimum, les coûts de disposition.

**Tableau 1.1** Estimations des masses des principales composantes d'une éolienne de 2 MW  
(compilation d'après : Martinez et al., 2009 et EWEA, 2009)

Composante	Masse (tonnes)	% Masse	% Coûts
Tour	143,0	65	26,3
Nacelle	2,0	1	1,4
Moyeu	13,3	6	4,0
Pales (3)	19,5	9	22,2
Transformateur/convertisseur	5,0	2	8,6
Génératrice	6,5	3	3,4
Multiplicateur	16,0	7	12,9
Fondation	10,5	5	4,5
Arbre lent	5,1	2	3,2
Autre	-	-	12,0

Selon les estimations de Synergie Matanie, 21 026 tonnes métriques de pales seront désuètes entre 2024 et 2041, en supposant une durée de vie de 25 ans. Pour diriger ce volume dans les lieux d'enfouissement technique (LET) de la région, Synergie Matanie prévoit des coûts s'élevant à 3 919 000 \$ pour la coupe, le transport et l'enfouissement, pour un coût unitaire de 186 \$ la tonne (L. Massicotte, courriel, 21 février 2018). À l'échelle mondiale, il est estimé qu'il y aura 43 millions de tonnes de pales usagés d'ici 2050, la Chine étant responsable de 40 % à elle seule (Liu et Barlow, 2015). Un taux de croissance annuel de la capacité d'énergie éolienne supérieur à 12 % était attendu entre 2013 et 2018 au niveau mondial (Global Wind Energy Council [GWEC], 2014). Aujourd'hui, environ 80 % des éoliennes peuvent être recyclables, en incluant les câbles (Guezuraga et al., 2012). Néanmoins, les pales et les rejets de production des composantes sont responsables de la majorité des déchets qui se retrouvent à l'enfouissement (D'Souza, Erhi et Shonfiled, 2011). La section suivante quantifiera les impacts potentiels sur l'environnement des éoliennes en se basant sur des ACV réalisées dans le passé.



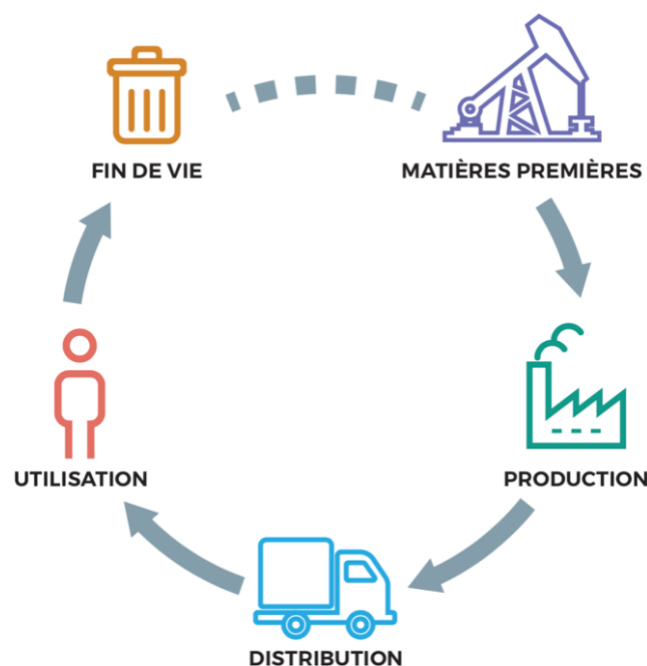
## 2. REVUE DE LITTÉRATURE

Cette section vise à introduire la pensée cycle de vie et le fonctionnement d'une ACV. Des résultats d'ACV concernant les éoliennes sont présentés pour situer l'importance de l'impact environnemental des pales en tant que composante, ainsi que la phase de fin de vie par rapport aux autres.

### 2.1 Résultats d'ACV concernant une éolienne complète

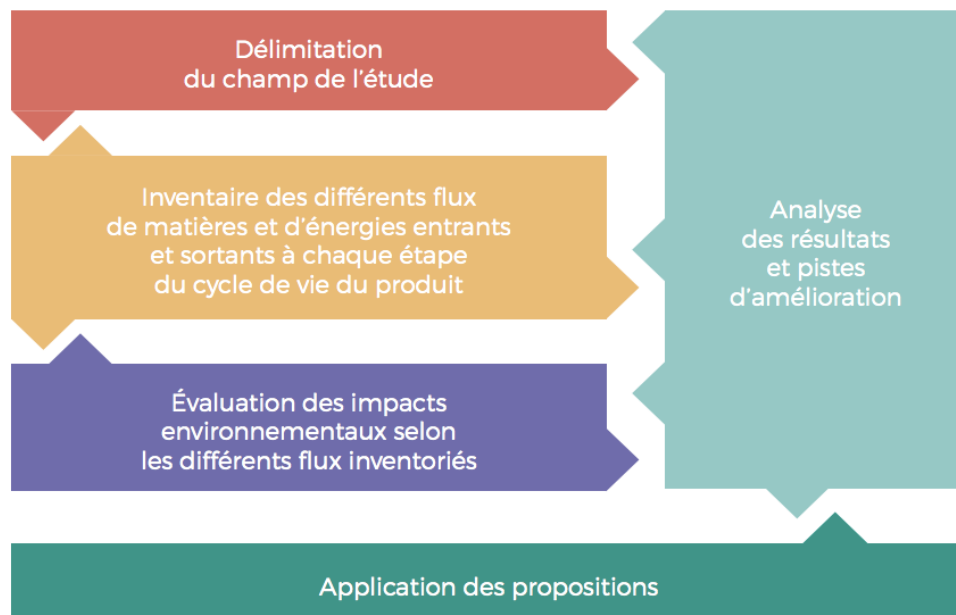
Le cycle de vie d'un produit est divisé en cinq phases. L'extraction des matières premières, la transformation de ces dernières en bien consommable, la distribution vers le client, l'utilisation et la disposition finale. Chacune des phases a un impact sur l'environnement. La figure 2.1 illustre le cycle de vie et ses différentes phases.

L'ACV est une approche reconnue mondialement et dont la méthodologie est encadrée par des normes. Elle permet de quantifier les différents impacts potentiels pour permettre, entre autres, de faciliter la prise de décisions, de trouver des pistes d'améliorations environnementales des produits et de supporter les efforts de marketing et communications (Organisation Internationale de Normalisation [ISO], 2006a). La norme ISO 14 040 spécifie les principes et cadres et la norme ISO 14 044 permet aux praticiens de se conformer aux exigences nécessaires à la réalisation d'une telle étude (ISO, 2006a ; ISO, 2006b).



**Figure 2.1** Représentation des phases du cycle de vie d'un produit (tiré de : Confédération générale des petites et moyennes entreprises [CGPME], 2017)

Une ACV est divisée en quatre phases. La définition des objectifs et du champ de l'étude permet de définir les frontières des systèmes et le niveau de détail nécessaire. La collecte de données s'effectue ensuite dans la phase de l'inventaire. L'étape d'évaluation des impacts permet d'évaluer les dommages environnementaux potentiels des systèmes à l'étude. En dernier lieu, il est nécessaire d'interpréter les résultats pour fournir des recommandations (ISO, 2006a). La figure 2.2 présente les différentes phases de l'ACV et leurs interactions.



**Figure 2.2 Phases de l'ACV selon ISO 14 040** (tiré de : CGPME, 2017)

Plusieurs études ont déjà été réalisées concernant le cycle de vie d'une éolienne complète. Les résultats de deux ACV sont présentés dans cette section selon deux angles d'approches. La contribution des phases du cycle de vie et la contribution de chaque composante de l'éolienne. Dans les deux cas, une attention particulière est portée à la phase de fin de vie et aux pales d'éoliennes.

La première étude a été réalisée par le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG) pour Hydro-Québec. Elle vise à évaluer les filières de production décentralisée d'énergie électrique à petite échelle, pour les comparer entre elles et par rapport au réseau d'Hydro-Québec (CIRAIG, 2013). L'étude ne se concentre pas seulement sur les éoliennes, mais elle présente tout de même des résultats pour des éoliennes de trois capacités différentes, soit 1 kW, 10 kW et 30 kW. La deuxième étude provient de l'Autriche et se concentre plus spécifiquement sur la consommation d'énergie de deux types d'éoliennes d'une capacité similaire. Le but est d'évaluer le potentiel de cette énergie en comparaison à des sources d'énergies fossiles en considérant les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et le retour sur investissement du point de vue énergétique (Guezuraga et al., 2012). Les deux études ont été réalisées en 2012 et 2013, c'est-à-dire qu'elles sont représentatives

temporellement. Par contre, elles ne possèdent pas les mêmes objectifs, méthodes de calcul ou données, pour ne nommer que ceux-là. Ainsi, il est intéressant de comparer les résultats pour voir si les mêmes grandes tendances et points chauds ressortent des analyses.

### **2.1.1 Contribution des phases du cycle de vie**

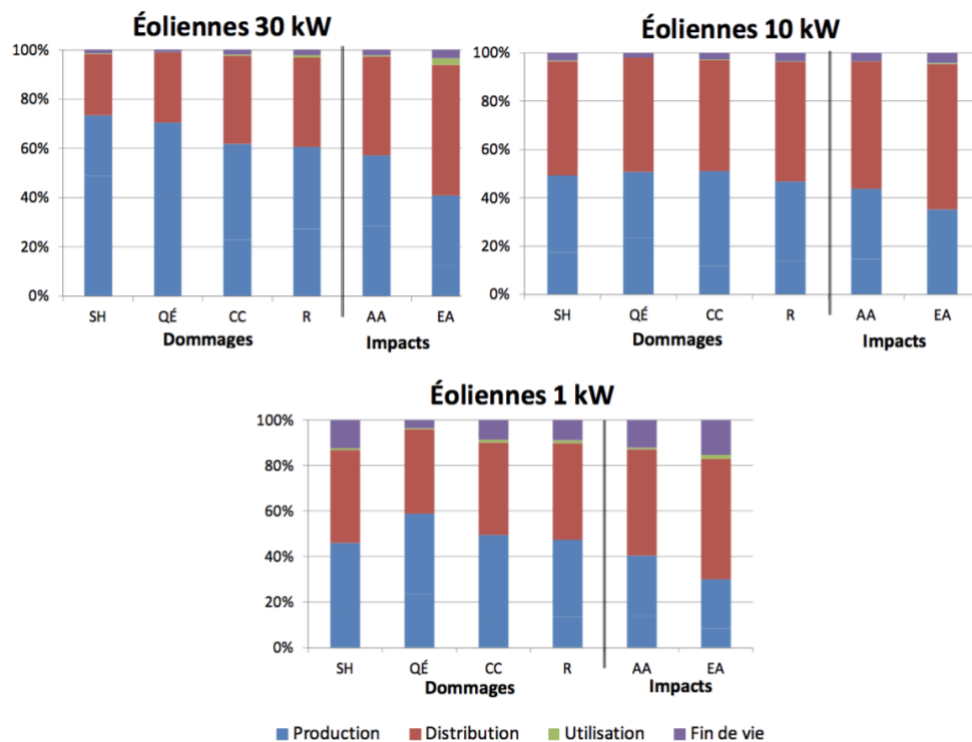
L'étude québécoise divise le cycle de vie en quatre étapes. C'est-à-dire la production, la distribution, l'utilisation et la fin de vie. La méthode de calcul permet d'évaluer quatre catégories de dommages. Il s'agit de la santé humaine (SH), la qualité des écosystèmes (QÉ), les changements climatiques (CC) et l'utilisation des ressources (R). Deux catégories d'impacts sont aussi considérées, soit l'acidification aquatique (AA) et l'eutrophisation aquatique (EA) (CIRAIG, 2013).

La figure 2.3 présente les résultats pour les éoliennes de 1, de 10 et de 30 kW. Règle générale, plus une éolienne a une grande capacité, plus sa performance environnementale est bonne, lorsque rapportée à la production de 1 kW d'électricité. Cela permet de remarquer que les étapes de production et de distribution prennent la plus grande part des impacts et des dommages. L'étape de production des composantes est traitée plus en profondeur dans la section suivante. Néanmoins, le transport par camion est responsable de plus du deux tiers des impacts de cette étape. De ce fait, les distances de transport ont une grande influence dans cette ACV. Pour ce qui est de l'étape de fin de vie, elle représente une proportion maximale de 15 % dans les catégories d'impact (CIRAIG, 2013).

L'indicateur retenu par l'étude autrichienne est la demande énergétique de chaque phase. L'étude considère cinq phases : la production, le transport, la maintenance, l'utilisation et le démantèlement. Les deux études présentent des tendances similaires. L'étape de production et le transport sont les deux phases qui contribuent le plus. Par contre, le transport prend une part beaucoup moins importante. L'étude étant réalisée en Europe, il est possible que les distances soient réduites. Ainsi, la production accapare à elle seule en moyenne 84,4 % de la demande énergétique sur le cycle de vie complet pour les deux modèles d'éolienne considérés. Le transport compte pour 7 % et la fin de vie pour seulement 3,1 % (Guezuraga et al., 2012).

### **2.1.2 Contribution des composantes**

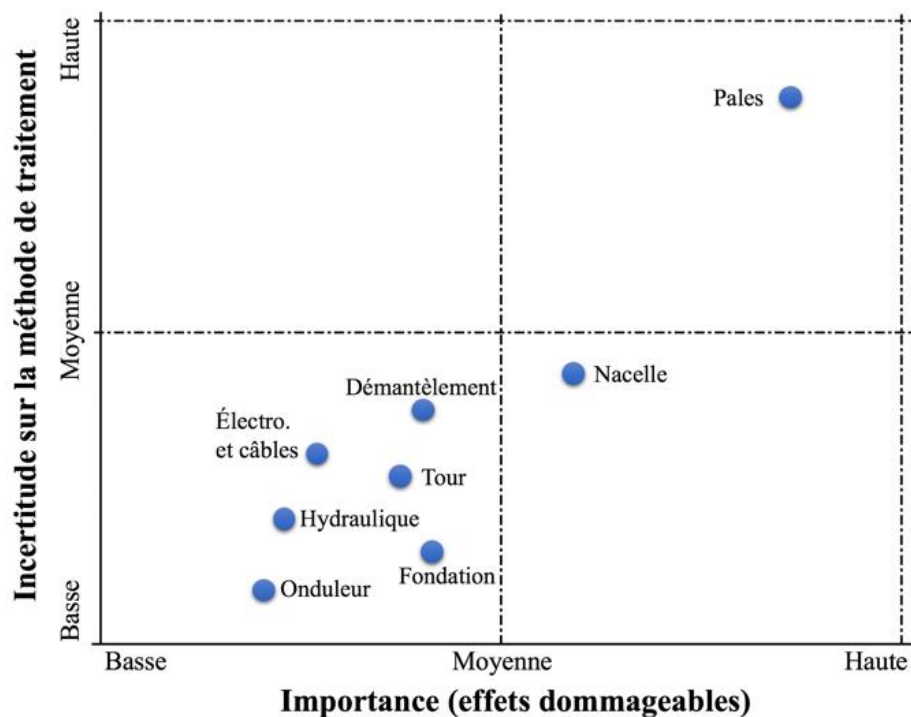
L'analyse de la contribution des composantes revient à étudier plus en détail l'étape de production. Les impacts peuvent être divisés en deux grandes catégories. C'est-à-dire une partie fixe, avec la tour et la fondation, et une partie mobile, soit la nacelle, les raccordements, les pales et autres. Selon les indicateurs retenus, la partie fixe est la principale contributrice. Pour les éoliennes de 1 et 10 kW dans l'étude québécoise, les indicateurs varient entre 54 % et 77 % de l'étape de production (CIRAIG, 2013).



**Figure 2.3 Contribution environnementale des étapes du cycle de vie des éoliennes** (tiré de : CIRAIG, 2013)

Pour ce qui est de l'étude autrichienne, la tendance est la même pour la demande énergétique. C'est la tour en acier et la fondation en béton qui consomment près de 80 % de l'énergie totale. Le rotor, qui inclut les pales, s'accapare environ 8 % de la demande énergétique (Guezuraga et al., 2012). À la lumière des résultats présentés dans cette section, il est possible de déterminer que les pales et l'étape de fin de vie ne représentent pas les éléments les plus dommageables du cycle de vie dans les études considérées. Toutefois, la réalisation d'une ACV demande de quantifier avec une grande précision des processus avec une certaine part d'incertitude. Ces incertitudes ne sont pas seulement dues à la méthodologie ou au manque de données, mais aussi à cause du niveau de maturité technologique des processus étudiés. En se concentrant sur la gestion en fin de vie des différentes composantes des éoliennes, les pales sont dans une catégorie à part à ce niveau.

Des travaux réalisés par des chercheurs danois ont mené à une classification des composantes des éoliennes en fonction de l'incertitude entourant leur traitement et les effets dommageables que les méthodes entraînent. La classification est le résultat d'ateliers avec des représentants de fournisseurs de services en matières résiduelles, de fabricants d'éoliennes, de consultants et de membres du milieu de la recherche universitaire (Andersen, Borup et Krogh, 2007). La figure 2.4 montre bien que les pales représentent la plus grande incertitude à l'égard de la gestion des composantes d'éoliennes désuètes (Andersen et al., 2007). En somme, un besoin subsiste pour approfondir les connaissances au sujet des méthodes de traitement, ainsi que leurs impacts sur l'environnement.



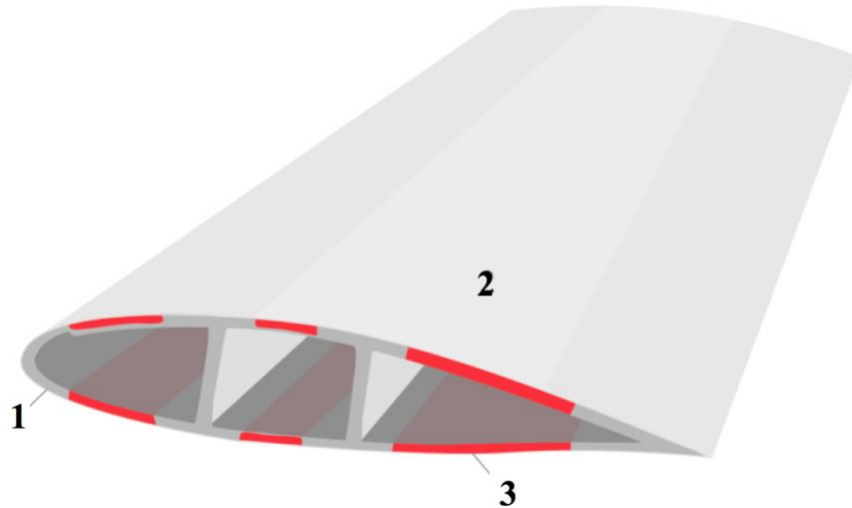
**Figure 2.4** Évaluation de l'impact environnemental et des incertitudes (traduction libre de : Andersen et al., 2007)

## 2.2 Description des pales d'éoliennes

L'incertitude entourant la gestion en fin de vie des pales provient de leurs compositions variables. Les pales sont composées de plusieurs matériaux avec des propriétés différentes pour répondre à des besoins spécifiques de l'équipement. La composition varie entre les différents manufacturiers et les modèles sur le marché. Il existe donc une grande variabilité à la source même des volumes. Néanmoins, les mêmes éléments reviennent généralement. Le tableau 2.1 dresse un portrait des matériaux utilisés pour chacune des sections d'une pale d'éolienne. La numération du tableau 2.1 se rapporte à la figure 2.5 qui montre une coupe transversale de l'intérieur d'une pale et le positionnement des composantes dans la structure.

**Tableau 2.1** Composition d'une pale éolienne (traduction libre de : Wind Europe, 2017)

#	Catégories	Exemple de matériaux
1	Fibre de renforcement	Fibre de verre ou fibre de carbone
	Matrice polymère	Résine thermodurcissable : époxy, polyester, polyuréthane ou thermoplastique
2	Couche de revêtement	Polyéthylène ou polyuréthane
3	Noyau en sandwich	Bois balsa ou mousse (chlorure de polyvinyle, polyéthylène téréphtalate, etc.)
4	Métaux	Acier pour les boulons, cuivre pour le filage, etc.



**Figure 2.5 Coupe transversale de l'intérieur d'une pale** (tiré de : Andersen, 2015)

Un composite est constitué de fibres et d'une matrice polymère. Selon les estimations d'un manufacturier de pales installé au Québec, la fibre de verre compose 75 % de la masse de ses pales et la résine polyester, 17 % (L. Massicotte, courriel, 21 février 2018). C'est-à-dire que la masse est constituée à 92 % de matériaux composites. Le problème avec les matériaux thermodurcissables est que le processus qu'ils subissent est irréversible et rend le recyclage très compliqué (Wind Europe, 2017). En revanche, ces matériaux représentent plusieurs avantages pour l'industrie, comme un faible coût de fabrication, une faible densité, la résistance à la corrosion et l'absence de conductivité thermique et électrique (Wind Europe, 2017).

De nos jours, les pales sont principalement composées de fibre de verre. À mesure où la puissance des éoliennes augmente, la longueur des pales augmente également. Pour cette raison, les manufacturiers se tournent de plus en plus vers d'autres matériaux comme la fibre de carbone. Cette dernière possède une plus grande rigidité, mais coûte plus cher (Mishnaevsky et al., 2017). Toutefois, les parcs déjà en service et qui devront être traités en premiers lieux sont à base de fibre de verre.

### **2.3 Durée de vie et cause de remplacement des pales**

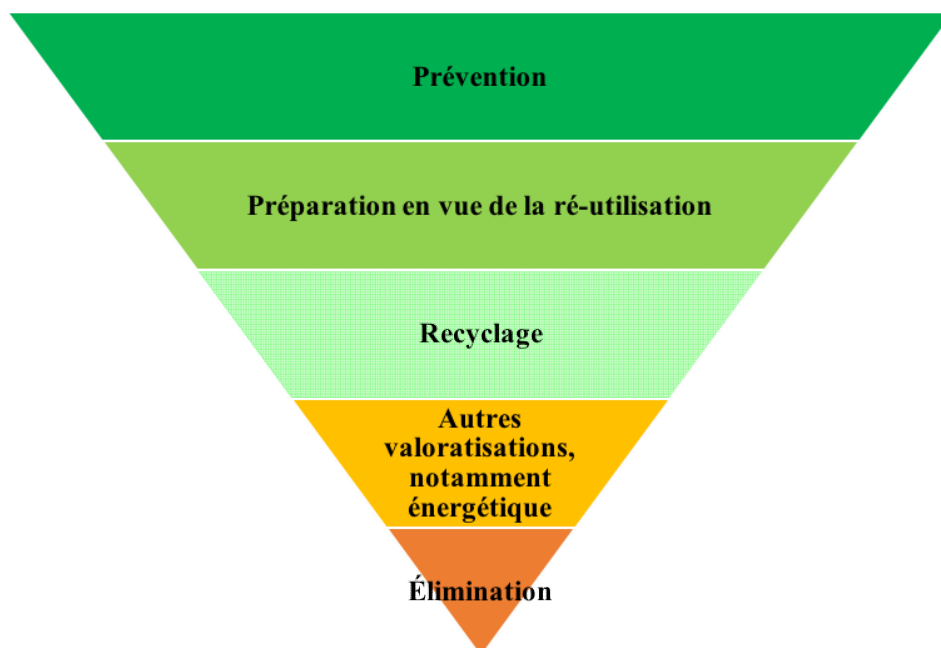
Dans la littérature et dans l'industrie, la durée de vie standard des pales d'éoliennes est estimée entre 20 à 25 ans (Beauson et Brøndsted, 2016). Au-delà de cette période, le manufacturier ne peut plus en garantir le bon fonctionnement. Il existe plusieurs causes qui rendent nécessaire le remplacement de cet équipement. Par exemple, la foudre, des vents trop forts ou d'autres événements climatiques extrêmes peuvent causer des dommages aux pales si les mécanismes de protection ne sont pas suffisamment résistants. En temps normal, le remplacement d'une pale d'éolienne s'effectue à la suite d'une inspection par un technicien où une défaillance est détectée. Les plus communes sont des fissures transversales, un

bris des joints adhésifs qui se trouvent le long de la pale de chaque côté et le décollage ou la délamination des composantes (Sorensen et al, 2004).

Une fois la défaillance identifiée, il est souvent possible d'y remédier. Le coût d'une pale neuve étant d'environ 75 000 \$, l'incitatif à les maintenir en service est significatif (S. Thériault, conversation en personne, 5 juillet 2018). Par contre, il n'est pas toujours possible de les remettre en bon état. Pour réparer une pale, l'ajout de matière est nécessaire. À ce moment, un risque de débalancement existe avec le nouveau poids qui vient d'être ajoutée. L'opérateur doit faire appel à un service d'ingénierie qui détermine si la réparation est possible. Lorsque ce n'est pas possible, il faut remplacer la pale et en disposer. Une autre raison qui pousse les exploitants de parcs éoliens à disposer de vieilles pales est l'opportunité d'en installer de nouvelles qui sont plus performantes suite au progrès technologique (Larsen et Sønderberg Petersen, 2014).

### 3. PROCESSUS DE GESTION DES PALES EN FIN DE VIE

Cette section recense les différentes techniques de traitement des pales d'éoliennes en fin de vie. La Directive 2008/98/CE de la Commission européenne propose une approche de hiérarchisation de la gestion des déchets. Elle se base sur le principe de la prévention. Elle met l'accent sur une responsabilité du producteur élargie et une limitation de l'usage de l'enfouissement. La figure 3.1 présente les différentes techniques à utiliser en priorité pour traiter les déchets. Le graphique doit être lu de haut en bas, c'est-à-dire en favorisant la prévention pour terminer avec l'élimination. Les méthodes de traitement seront présentées selon cette hiérarchie en partant de la plus recommandée pour finir avec celle à éviter le plus possible.



**Figure 3.1 Hiérarchie de traitement des déchets** (traduction libre de : Commission européenne, 2008)

#### 3.1 Prévention et réemploi

La prévention des déchets s'effectue à la source, pendant de la conception des pales. Cela permet de diminuer la quantité de matière utilisée, de choisir des matériaux plus faciles à recycler ou bien de réduire les pertes lors du processus de fabrication. Selon un manufacturier des pales avec des installations au Québec, 10 à 20 % des pertes en matériaux composites sont générées au moment de la fabrication (C. Pérez-Levesque, discussion en personne, 24 mai 2018). Elle s'effectue aussi en allongeant la durée de vie des pales par les inspections et l'entretien comme il a été décrit dans la section précédente.



Le réemploi est une avenue à explorer dans certains cas, même s'il n'est pas recommandé par les manufacturiers. À la fin de la durée de vie de 20 ans, il est possible que les pales possèdent toujours une capacité résiduelle. Des travaux réalisés en Allemagne ont démontré qu'il n'y avait pas nécessairement de diminution significative de rigidité ou bien de dommage apparent sur celles-ci (Sayer et al., 2009). D'ailleurs, des compagnies européennes comme Blue Planet Wind, Enerpower et Repowering Solutions vendent des pales remises à neuf (Beauson et Brøndsted, 2016). Ces techniques semblent plus abordables pour des éoliennes de petite taille, la rentabilité de ces opérations étant discutable pour les plus grandes en raison des défis du transport (Beauson et Brøndsted, 2016).

### 3.2 Réutilisation

La réutilisation et le réemploi sont deux concepts différents. Le premier change la fonction initiale de l'objet avec pratiquement aucune étape de transformation. Le deuxième signifie que la fonction ne change pas. De nombreux exemples de réutilisation existent, mais il s'agit principalement d'application ponctuelle, difficile à appliquer à une échelle industrielle. Par exemple, l'utilisation dans du mobilier urbain dans les parcs, comme des jeux pour enfants ou bien des bancs publics (Wind Europe, 2017). Des applications existent même déjà dans l'Est-du-Québec. La figure 3.2 montre une utilisation comme panneau d'affichage pour une halte routière le long de la route 132 en Haute-Gaspésie.



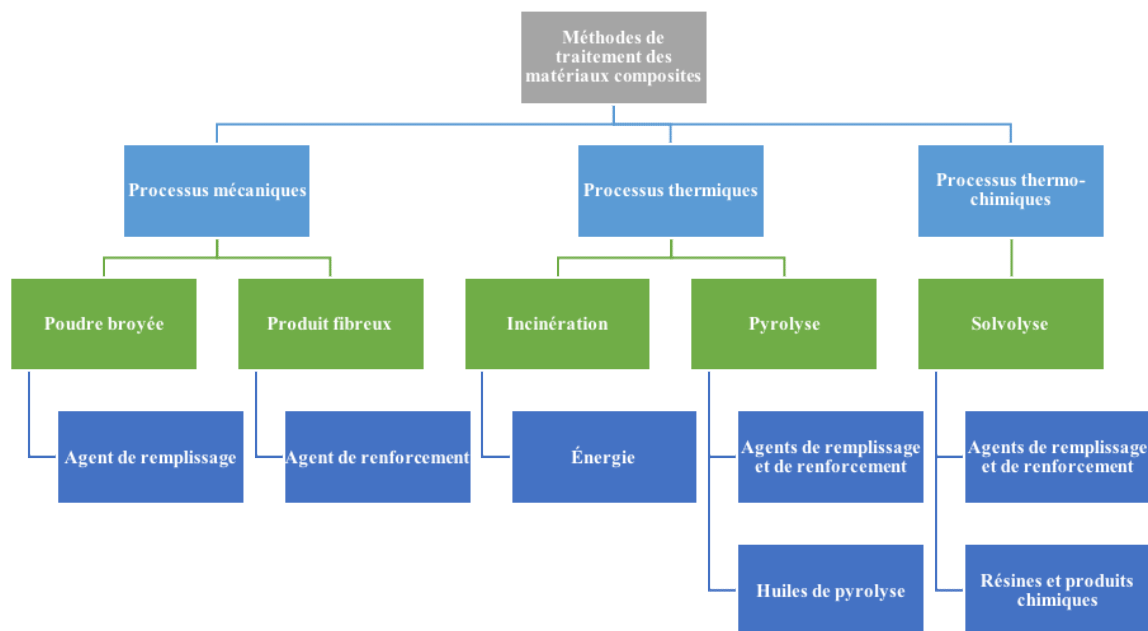
**Figure 3.2** Exemple de réemploi dans l'Est-du-Québec (tiré de : Google, 2013)

D'autres applications potentielles ont déjà été discutées dans la littérature sans qu'elles soient mises en place. Dans son mémoire de maîtrise déposé à l'Université de Gotland en Suède en 2011, Rahnama suggère d'utiliser les pales comme récif corallien artificiel. L'application dans l'océan serait possible, car les matériaux composites sont inertes, c'est-à-dire qu'ils ne forment pas de réactions chimiques dans l'eau salée. Également, les pales ne comportent pas de risque d'écoulement de produits chimiques dans l'océan (Rahnama, 2011). Il n'a pas été possible de trouver des suites à cette suggestion dans la littérature dans le cadre de cette recherche. Par contre, cela ouvre tout un pan d'application dans l'océan. Par exemple pour la protection des berges. À l'échelle du Québec maritime, le coût de l'érosion côtière est

estimé à 1,5 milliard d'ici 2065, en dollars de 2012, en raison des infrastructures près des rivages au Bas-Saint-Laurent et en Gaspésie particulièrement (Bernatchez, Dugas, Fraser et Da Silva, 2015). Ces coûts incluent le remplacement de route, la perte de valeur foncière, des ouvrages de protection et des travaux d'empierrement et de recharge de plage. Selon un ingénieur du Centre de développement des composites du Québec (CDCQ), il s'agit d'une application qui gagnerait à être investiguée davantage (D. Poirier, discussion en personne, 24 mai 2018).

### 3.3 Recyclage

S'intéresser au recyclage des pales d'éoliennes veut aussi dire, dans un spectre plus large, s'intéresser au recyclage des matériaux composites. Il existe trois catégories de valorisation des matériaux composites, il s'agit des processus mécaniques, thermiques et thermochimiques. La figure 3.3 présente de façon concise les différentes catégories, les techniques utilisées ainsi que différentes options de débouchés possibles. Chaque technique sera abordée dans cette section.



**Figure 3.3 Méthodes de traitement des matériaux composites** (inspiré de : Pickering, 2006)

### 3.4 Processus mécaniques

Les processus mécaniques ont l'avantage d'être simples en application et moins énergivores que les processus nécessitant une chaleur élevée (Wind Europe, 2017). Cette simplicité aide à garder les coûts de traitement relativement bas. Ces opérations servent à réduire la taille des matériaux composites par la coupe, le déchiquetage, le tamisage ou le broyage. La réduction se fait jusqu'à tant qu'il soit possible de séparer les portions de fibres, de résines et de métaux. Cependant, elles entraînent une dégradation

importante des propriétés mécaniques de la fibre, ce qui limite les applications subséquentes (Yang et al., 2012).

Le produit résultant peut ensuite être utilisé dans la fabrication de béton. Trois applications potentielles sont envisageables, c'est-à-dire la substitution de différents matériaux traditionnels. La première est l'utilisation comme ajout cimentaire. En effet, comme pour le verre, la fibre de verre contient de la silice. Cela procure des propriétés de liant lorsqu'il entre en contact avec de la chaux. Le potentiel de cette application reste à prouver dans le cas des pales d'éoliennes. Malgré tout, ce dernier a déjà été démontré pour le verre, alors qu'il est estimé que la poudre de verre pourrait substituer 20 à 30 % du ciment Portland dans le béton (Tagnit-Hamou et Bengougam, 2012 ; Dallaire, 2013). Il s'agit de l'utilisation dans le béton avec le plus de valeur ajoutée en raison du procédé de production très énergivore du ciment substitué. La deuxième application est comme agrégat grossier, qui ont tendance à être de nature fibreuse. Cela cause plusieurs problèmes lors de l'application dans le béton, et qui entraîne ultimement en une perte de propriétés mécaniques à mesure que la proportion de verre augmente (Topcu et Canbaz, 2004). Cela s'explique entre autres par les surfaces planes créées par la résine, qui réduisent l'adhésion entre le ciment et les matériaux composites (Asokan, Osmani et Price, 2009). La nature fibreuse tend à donner des propriétés anisotropes au béton, c'est-à-dire qu'elles dépendent de la direction de l'alignement des fibres, ce qui représente un défi important dans la pratique (Correia, Almeida et Figueira, 2011). La troisième application est plutôt l'utilisation comme agrégat fin, aussi connu sous le nom de filler. La distinction se fait au niveau de la taille de particules, conformément à la norme européenne EN 12 620 (2002), 96 % des particules doivent mesurer moins de 63  $\mu\text{m}$  pour être classée ainsi. Dans ce cas, la matière substituée est le sable. Par contre, la prudence est de mise quant à la quantité qui est substituée. Pour limiter les pertes de performances mécaniques et de durabilité du béton, le taux de substitution maximum possible du sable est de 5 % (Correia et al., 2011). Néanmoins, même avec seulement 5 %, la résistance à la compression est affectée, une perte de 19,4 % selon les résultats de l'étude de Correia et al. (2011). Bref, il faudra favoriser des applications du béton où ces caractéristiques ne sont pas la priorité, comme pour des dalles de trottoirs.

### **3.5 Processus thermiques et thermochimiques**

La deuxième catégorie de recyclage des matériaux composites est les processus thermiques. Ceux-ci utilisent la chaleur pour mettre en valeur la matière. Ces processus ne valorisent pas tous la même chose, c'est pourquoi deux sections sont présentées, c'est-à-dire la pyrolyse et l'incinération. Les processus thermochimiques y sont aussi présentés pour respecter l'ordre de la hiérarchisation du traitement des déchets.

### 3.5.1 Pyrolyse

La pyrolyse est un procédé qui décompose les molécules organiques dans un four à une température variant entre 450 et 700 °C sous atmosphère inerte, c'est-à-dire sans oxygène (Akesson, Foltynowicz, Christeen et Skrifvars, 2012). Avant d'entrer dans le four, les pales doivent être sectionnées, puis approvisionnées par fournée ou bien par alimentation continue. Une fois que la portion organique de la fibre est libérée, à savoir la résine qui forme le liant, elle peut servir d'agent de renforcement dans la colle ou la peinture (Mativenga, Shuaib, Howarth, Pestalozzi et Woidasky, 2016). La réaction forme aussi des sous-produits. C'est qu'en effet, le gaz de synthèse peut servir de carburant à la réaction et réduire sa consommation d'énergie (Mativenga et al., 2016).

Toutefois, lorsque la fibre de verre est chauffée au-delà de 250 °C, il y a une perte de ses propriétés mécaniques (Thomasson, Yang et Meier, 2014). Cela complique sa valorisation vis-à-vis de la fibre de verre neuve. Des procédés à l'échelle industrielle ont déjà été en service, tel que celui de l'entreprise danoise ReFiber. Elle recyclait la fibre de verre pour en faire de l'isolant. Par contre, après cinq ans en affaires la compagnie a cessé ses activités pour des raisons économiques (Larsen et Sønderberg Petersen, 2014). Cela démontre bien la difficulté de valorisation des pales par cette filière au niveau commercial.

### 3.5.2 Processus thermochimiques

La solvolyse diffère de la pyrolyse, car c'est un solvant, que ce soit de l'eau, de l'alcool ou bien un acide, qui est utilisé pour dissoudre la portion organique (Morin, Loppinet-Serani, Cansell et Aymonier, 2012). Une pression contrôlée doit aussi être appliquée, en plus de nécessiter une température entre 300 et 650 °C (Morin et al., 2012). Cela crée des conditions qui détériorent la fibre de verre comme dans le cas de la pyrolyse.

De plus, le coût de l'opération est un problème pour le recyclage de la fibre de verre. C'est pourquoi la plupart des recherches à l'échelle expérimentale se concentrent sur la fibre de carbone (Mativenga et al., 2016). L'entreprise française Extrathive a développé et breveté un procédé qui se base sur le principe de la solvolyse, en combinant un catalyseur et un solvant, ce qui diminue les coûts considérablement jusqu'à être rentable pour de la fibre de carbone (Oliveira, 2018, mai). La température nécessaire à la réaction est inférieure à 200 °C, ce qui ne détériorait pas significativement les propriétés mécaniques de la fibre de verre (Thomasson et al., 2014). Le sous-produit de la réaction est une solution qui contient la fraction organique dépolymérisée. Cette dernière gagnerait à être valorisée pour améliorer la valeur ajoutée du procédé.

### **3.5.3 Incinération en cimenterie**

Le dernier échelon de la hiérarchie de traitement des déchets avant l'enfouissement est la valorisation énergétique. Dans le contexte québécois, cela se traduit surtout par l'incinération en cimenterie. Les carburants alternatifs, comme les pneus usagers ou les plastiques non recyclables, représentaient déjà 34 % de l'énergie nécessaire à la production de ciment dans la province en 2008, un sommet au Canada (Giroux Environmental Consulting, 2014).

Dans le cas des pales d'éoliennes, la portion combustible est principalement la portion organique composée de bois balsa et de résine de polyester. Cela se traduit par un contenu en énergie thermique de 14 MJ/kg, ce qui représente environ la moitié de celui du charbon (Schmidl, s. d.). À la suite de la combustion, la portion inorganique, à savoir la fibre de verre, n'est toujours pas brûlée. Ce qui explique le taux de cendre très élevée des pales, qui se situe autour de 50 % (Schmidl, s. d.). La cimenterie de Lägerdorf en Allemagne utilise présentement les pales dans son procédé. La cendre générée est même réincorporée au clinker, en substitution du sable, pour produire du ciment d'une qualité qui ne diffère pas du ciment normal selon l'entreprise (Feih et al., 2011). De ce fait, l'ensemble du volume de pale est détourné de l'enfouissement. Néanmoins la combustion des pales produit une réaction alcali-silice qui est nuisible au ciment (Idir, Cyr et Tagnit-Hamou, 2010). Ainsi, il est nécessaire de balancer les propriétés chimiques des matières premières pour obtenir une qualité de clinker satisfaisante (Schmidl, s. d.).

### **3.6 Enfouissement**

Finalement, l'enfouissement reste encore la méthode la plus utilisée à l'échelle mondiale pour la disposition des matériaux composites (Pickering, 2006). Dans le cas des pales, elles sont sectionnées aux dimensions nécessaires pour éviter le transport hors-norme et dirigé vers un LET. Cette option n'offre en aucun cas la possibilité de revaloriser la matière. Elle contribue à remplir les LET qui possèdent une capacité limitée, ce qui oblige les autorités à en ouvrir d'autres. Dans certains pays, l'occupation des sols est un enjeu important, car le territoire disponible est plus limité qu'en Amérique du Nord. C'est pourquoi des pays instaurent des taxes nationales sur l'enfouissement ou bien mettent carrément en place l'interdiction d'enfouir certaines matières. C'est le cas pour l'Allemagne, qui interdit l'enfouissement des matériaux composites (Schmidl, s. d.). Au Canada, il n'existe pas d'interdiction d'enfouir les matériaux composites. Par surcroît, les coûts pour disposer des matières au dépotoir sont faibles dans plusieurs provinces et aussi dans les États américains juste au sud de la frontière, ce qui ne favorise pas les initiatives de détournement (Giroux Environmental Consulting, 2014).

### **3.7 Sommaire des techniques de traitement des composites**

Essentiellement, chaque technique comporte un niveau de maturité, un coût et un requis énergétique pour produire de la fibre d'une qualité variable. L'état des connaissances actuel montre que le recyclage des matériaux composites n'est pas un problème technologique, mais plutôt commercial. Règle générale, plus la fibre est longue, plus elle est résistante et plus sa valeur économique est bonne. Dans tous les cas, elle sera moins performante que la fibre neuve (Wind Europe, 2017). Qui plus est, le coût du traitement pour obtenir une fibre de bonne qualité doit être inférieur au coût de la fibre neuve pour être économiquement viable. C'est pourquoi certains modèles d'affaires, comme celui de la société Extracthive en France, sont viables avec de la fibre de carbone, mais pas avec de la fibre de verre (Oliveira, 2018, mai).

Ce projet se concentre sur le parc éolien de l'Est-du-Québec et plus spécifiquement sur les pales d'éoliennes en fibre de verre. Les techniques de recyclage à l'étude sont celles qui sont potentiellement rentables pour cette fibre dans le but qu'elles soient applicables sur le terrain. La présente étude cherche à trouver la technique qui a le plus de sens au niveau environnemental, en considérant les acteurs économiques présents sur le territoire de la région désignée. Cette décision s'inscrit dans la logique de l'économie circulaire de privilégier les circuits les plus courts et les plus locaux possible (RECYC-QUÉBEC, 2018).

## **4. DÉFINITION DES OBJECTIFS ET CHAMPS DE L'ÉTUDE**

Cette section jette les bases de l'ACV. Le cadre méthodologique y est présenté, dont l'unité fonctionnelle et les frontières du système à l'étude, conformément aux normes ISO 14 040 et 14 044. À la lumière de l'état des connaissances présenté précédemment, trois scénarios ont été développés pour la modélisation. Ils seront présentés en profondeur dans cette section.

### **4.1 Objectifs de l'étude et application envisagée**

L'objectif principal de cette ACV est d'évaluer les bénéfices environnementaux en lien avec la valorisation des pales d'éoliennes dans une démarche d'économie circulaire dans l'Est-du-Québec. Plus précisément, les objectifs spécifiques de l'étude sont les suivants :

- Mesurer la performance environnementale de différents scénarios de traitement en fin de vie des pales d'éoliennes.
- Évaluer si les distances de transport influencent la performance environnementale des scénarios à l'étude de manière significative.
- Proposer des recommandations pour la mise en valeur des pales en fin de vie dans le contexte de l'Est-du-Québec.

À l'heure actuelle, les pales qui ont dû être disposées prématurément dans la région ont été enfouies au LET le plus près. C'est-à-dire que les scénarios 2 et 3 évalués dans cette étude n'ont pas encore été testés en pratique.

### **4.2 Description des filières de gestion de fin de vie à l'étude**

Les pales d'éoliennes en fin de vie sont récupérées sur le site du parc éolien à la demande de l'opérateur. L'état des connaissances présentait une évaluation exhaustive des options de valorisation possibles pour les pales d'éoliennes. Compte tenu de la revue de littérature qui précède, plusieurs options sont écartées de l'ACV. Ces choix s'expliquent par des motifs de rendement des procédés et économiques, les propriétés mécaniques de la fibre de verre sont réduites considérablement ce qui entraîne une valeur commerciale virtuellement nulle. De ce fait, il en coûtera plus cher de recycler que d'acheter neuf. Une question de capacité de traitement des volumes est aussi considérée. Par exemple, l'aménagement de mobilier urbain est intéressant, mais il est peu plausible qu'assez de municipalités de l'Est-du-Québec cherchent à se différencier de cette manière. En dernier lieu, une attention a été portée aux acteurs économiques régionaux pour favoriser les circuits les plus courts possible entre le gisement et son centre de traitement. Somme toute, trois filières de gestion en fin de vie sont à l'étude. Il s'agit de l'enfouissement en LET, de la valorisation dans le béton et de l'incinération en cimenterie.

#### 4.2.1 Collecte

Une étape commune aux trois scénarios est la collecte des pales d'éoliennes, qui diffère grandement de la collecte des matières résiduelles des ménages. Elle s'effectue ponctuellement à la demande des opérateurs de parcs éoliens lorsqu'une pale est jugée irréparable. À ce moment, la pale est démontée de la structure de l'éolienne pour être prise en charge par un fournisseur de services en gestion des matières résiduelles. Les pales d'une éolienne de 1,5 MW, soit parmi les moins puissantes de la région désignée, mesurent environ 30 à 35 mètres (TechnoCentre éolien, 2018). Concrètement, cela signifierait du transport hors dimension avec excédent arrière lors du démantèlement (Société de l'assurance automobile du Québec [SAAQ], 2018). Pour éviter cette contrainte et minimiser les coûts, les pales sont découpées sur place à l'aide d'une pelle mécanique équipée d'une cisaille. La figure 4.1 montre l'équipement en question. Il est possible d'imaginer que la coupure est assez grossière et occasionne des pertes difficiles à quantifier.



**Figure 4.1** Pelle mécanique équipée d'une cisaille

Par la suite, les morceaux de pales sont chargés dans des camions-bennes d'une capacité maximale de 32 tonnes métriques (H. Desjardins, conversation en personne, 5 juillet 2018). En raison de la masse volumique de ces dernières, il n'est pas possible d'atteindre le poids maximal pour chaque chargement. En dernier lieu, les camions-bennes se dirigent vers une des différentes options de traitement.

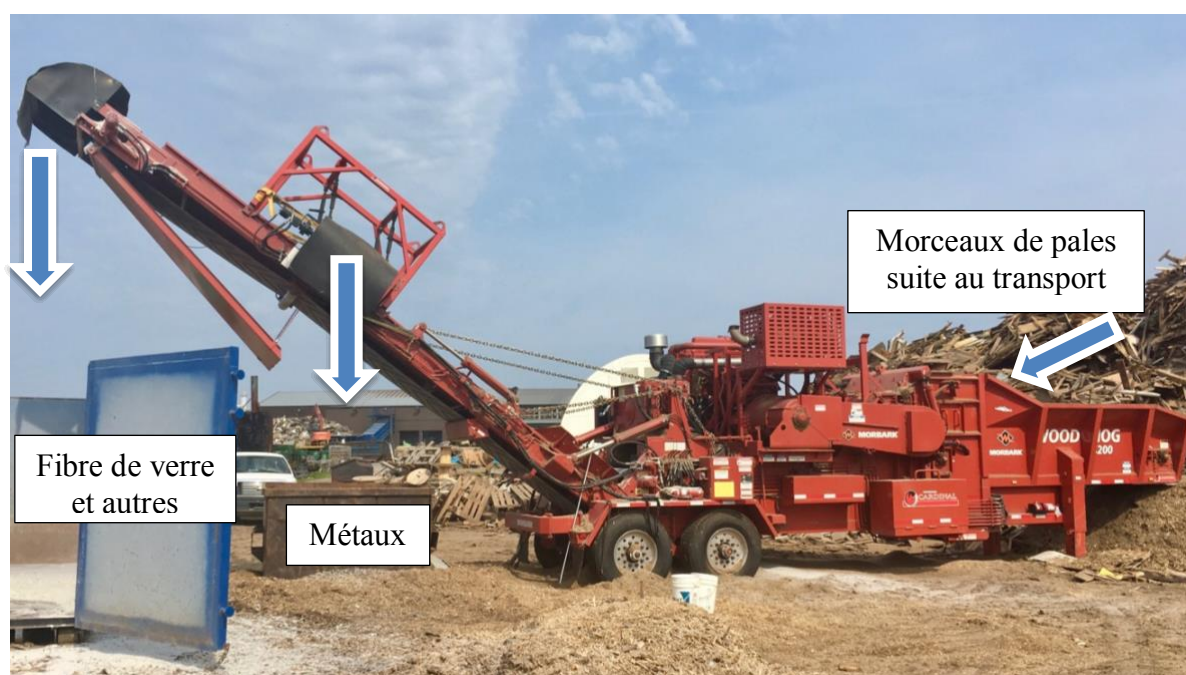


#### 4.2.2 Scénario 1 : Enfouissement

Le premier scénario représente la situation actuelle. En ce moment, les pales sont enfouies dans un des trois LET répartis autour de la péninsule gaspésienne dans l'optique de minimiser la distance de transport depuis le parc éolien. Les coûts d'enfouissement au Québec sont très compétitifs. Il en coûte 119,57 \$ par tonne pour enfouir des matières au LET de Matane (Ville de Matane, 2018). En incluant la coupe en morceaux et le transport, le coût total d'enfouissement des pales est évalué à 186 \$ par tonne (L. Massicotte, courriel, 25 avril 2018). Concrètement, cela indique la marge de manœuvre pour développer une filière qui détourne les pales de l'enfouissement, car les gestionnaires de parcs éoliens favorisent l'option la plus économique.

#### 4.2.3 Passage au centre de tri

Pour les scénarios 2 et 3, une étape commune supplémentaire est nécessaire pour la suite du traitement. En effet, après avoir été coupés au parc éolien, les morceaux de pales mesurent encore environ dix mètres de long. Au lieu de se rendre directement dans un LET, ils seraient envoyés à un centre de tri. À l'aide d'une déchiqueteuse à bois, la taille est ensuite réduite de façon mécanique. Un équipement du genre présente l'avantage d'effectuer la séparation des métaux pour son recyclage au moyen d'un aimant situé au-dessus du convoyeur principal. L'équipement est utilisé par Groupe Bouffard situé à Matane pour produire de la bioénergie forestière et est visible à la figure 4.2.



**Figure 4.2 Déchiqueteuse à bois**

Lors d'une visite le 5 juillet 2018, il a été possible de voir l'équipement en action pendant le déchiquetage de morceaux de pales. En aucun moment cela n'a semblé difficile pour l'équipement de

broyer cette matière. L'opération s'effectue à l'extérieur et sans système de récupération de la poussière. Par la force des choses, cela entraîne des pertes à cause du vent qui envoie la matière à l'extérieur du conteneur prévu à cet effet. Des questions émergent aussi au niveau de la santé et sécurité des travailleurs qui pourraient inhaler cette poussière. Le produit de cette opération n'est pas nécessairement directement utilisable pour une autre application. Par contre, il devient beaucoup plus facilement valorisable par un industriel. De plus, son passage dans un centre de tri permet d'avoir un espace de stockage pour la matière. Ainsi, le fournisseur de service peut agglomérer les volumes qu'il récolte ponctuellement jusqu'à ce qu'ils atteignent une quantité suffisante pour l'expédier à l'utilisateur final. La figure 4.3 montre le produit de l'opération.



**Figure 4.3** Produit du déchiquetage des pales

#### **4.2.4 Scénario 2 : Valorisation dans le béton**

L'état des connaissances a démontré qu'il existe différentes options pour valoriser les pales d'éoliennes dans le béton. Le béton est un produit de choix pour détourner des matières de l'enfouissement. En effet, les différentes applications du béton permettent un large spectre de propriétés, ce qui laisse une certaine liberté au niveau des intrants. Que ce soit en substituant des agrégats, les ajouts cimentaires ou bien les fillers. Néanmoins, la production de béton est assujettie à de nombreuses normes. L'Association canadienne de normalisation (CSA) est responsable de mettre en place et de diffuser ces normes au Canada. Avant de permettre une nouvelle application, elle doit s'appuyer sur un processus qui allie la

rigueur technique et la recherche du consensus (Association canadienne de normalisation [CSA], 2018). La norme CSA A23.1-14 est la version la plus à jour concernant les matières qui peuvent être utilisées dans le béton. La norme CSA-A3000-13 quant à elle, touche les ajouts cimentaires.

Dans le cadre de cette étude, l'application retenue consiste à broyer la portion non métallique des pales en une poudre très fine, c'est-à-dire moins de 63  $\mu\text{m}$ , pour substituer le sable à l'intérieur du béton comme filler, aussi appelé agrégat fin (Correia et al. 2011). Concrètement, il faut ajouter le transport du centre de tri vers le producteur de béton et le broyage fin de la matière aux étapes nécessaires pour donner une seconde vie. Ce scénario bénéficiera du crédit environnemental de la production de sable évité, ainsi que du recyclage de la portion métallique.

#### **4.2.5 Scénario 3 : Incinération en cimenterie**

L'utilisation de carburant alternatif n'est pas inédite au Québec. Déjà en 2008, environ 34 % de l'énergie utilisée par les cimenteries provenait des carburants alternatifs, comme des pneus et des bardeaux d'asphalte (Giroux Environmental Consulting, 2014). Des démarches ont été réalisées par le Regroupement des Industries des Composites du Québec (RICQ) pour évaluer la faisabilité de cette filière pour les matériaux composites. Au final, une longue série de conditions ont été fixées par les cimentiers pour accepter les matériaux composites dans leurs procédés d'incinération (RICQ, 2017). Les pales d'éoliennes ne répondaient pas aux critères des cimenteries sur le territoire québécois pour deux raisons principales. La valeur calorique des pales est jugée trop faible et elles génèrent des alcalis, une base forte, ce qui est mauvais pour la production du clinker (G. Desautels, courriel, 21 juin 2018). Malgré tout, ce scénario se base sur le procédé développé en Allemagne par Holcim. Il s'agit du procédé à l'échelle industrielle pour traiter les pales d'éoliennes en fin de vie qui est en exploitation depuis le plus longtemps selon les informations recensées dans cette étude. Elle a émergé suite à une interdiction d'enfouissement de cette matière par le gouvernement allemand (Schmidl, s. d.). Ceci a forcé les propriétaires de parcs éoliens à chercher des débouchés pour diverger complètement.

Après avoir passé par le centre de tri, la portion non métallique des pales est expédiée à une cimenterie où elle subira deux transformations. Tout d'abord, elle est brûlée pour produire de la chaleur. Dans ce scénario, la cendre est récupérée à la sortie du premier four et est envoyée à l'enfouissement. Le crédit environnemental de ce scénario sera la production de charbon et du recyclage de la portion métallique comme pour le scénario 2.

#### **4.3 Fonctions et unité fonctionnelle**

Le choix d'une unité fonctionnelle, soit l'unité quantitative à laquelle les calculs d'évaluation des impacts se rapportent, est fondamental dans une ACV. Elle permet de rapporter chacun des flux à cette

unité. De plus, comme la variabilité entre les différents modèles de pales d'éoliennes est importante, autant en termes de capacité que de procédés de fabrication, il est important que l'unité soit représentative du service rendu, c'est-à-dire sa fonction primaire. Pour l'ensemble des scénarios, la fonction primaire à l'étude consiste à :

« Gérer des pales d'éoliennes en fin de vie dans la région désignée. »

L'unité fonctionnelle est entre autres utilisée pour faciliter la communication des résultats. Dans cette étude, le volume de pale considéré est celui qui est déjà en service dans la région désignée au 16 novembre 2017. À cette date, il y avait une capacité de 2024,5 MW d'installée sur le territoire (TechnoCentre éolien, 2018). Selon des estimations d'experts, pour chaque kilowatt de puissance installée, 10 kg de pales sont nécessaires (Albers, Greiner, Seifert et Kühne, 2009). Le volume total peut être estimé à 20 245 tonnes de pales d'éoliennes qui devront être traitées dans le prochain 20 à 25 ans. C'est pourquoi l'unité fonctionnelle de la fonction primaire utilisée pour cette analyse, c'est-à-dire la quantification de la fonction, est :

« Gérer 20 245 tonnes métriques de pales d'éoliennes en fin de vie dans la région désignée (Gaspésie et MRC de la Matanie) en 2018. »

Cependant, les scénarios de fin de vie à l'étude offrent une valorisation de la matière en l'utilisant comme un nouveau produit, sauf dans le cas de l'enfouissement. Ce qui fait que le scénario 2 (valorisation dans le béton) et le scénario 3 (incinération en cimenterie) possèdent des fonctions secondaires propres à chacun. Le scénario 1 (enfouissement) répond seulement à la fonction primaire, ce qui pose un problème au niveau de l'équivalence fonctionnelle des scénarios. Pour s'assurer que les comparaisons sont valables, il est nécessaire d'appliquer la méthode de l'extension des frontières. Cette méthode est la première à considérer selon la norme ISO 14040 pour les systèmes multifonctionnels indivisibles. Le but est de tenir compte de la fabrication du produit qui est substitué (ISO, 2006a).

Pour ce faire, il est nécessaire d'établir les fonctions secondaires des scénarios à l'étude, qui permettront de trouver un produit qui fournit une fonction équivalente. Les fonctions secondaires sont présentées dans le tableau 4.1.

**Tableau 4.1 Fonctions secondaires des scénarios**

Scénarios	Fonctions secondaires
1. Enfouissement	N/A
2. Valorisation dans le béton	Produire un agrégat fin pour béton
	Produire de l'acier
3. Incinération en cimenterie	Produire un combustible pour four de cimenterie
	Produire de l'acier

Chacune de ces fonctions secondaires nécessite à leur tour une unité fonctionnelle propre à chacune pour rapporter les évaluations des impacts. Ces dernières ont été établies en tenant compte des caractéristiques de performance des produits générés aux meilleures des connaissances à ce jour.

Il existe deux approches pour utiliser le principe d'extension des frontières. La première approche additionne les impacts environnementaux de la production qui n'est pas évitée par les autres scénarios, c'est-à-dire la production à partir de matériaux neufs. Quant à elle, la deuxième consiste à soustraire d'un scénario les impacts environnementaux de la production qui est évitée par le nouveau produit. Par exemple dans le cas de l'utilisation des pales comme combustible de cimenterie, il faut soustraire la production de charbon des impacts du scénario. Cette dernière est celle qui est préférée dans le cadre de cette étude. Autrement, le scénario de l'enfouissement, qui représente la situation actuelle et est nécessaire à la comparaison, ne ferait plus de sens physiquement. La figure 4.4 illustre l'extension des frontières qui a été nécessaire pour chaque scénario pour en assurer l'équivalence.

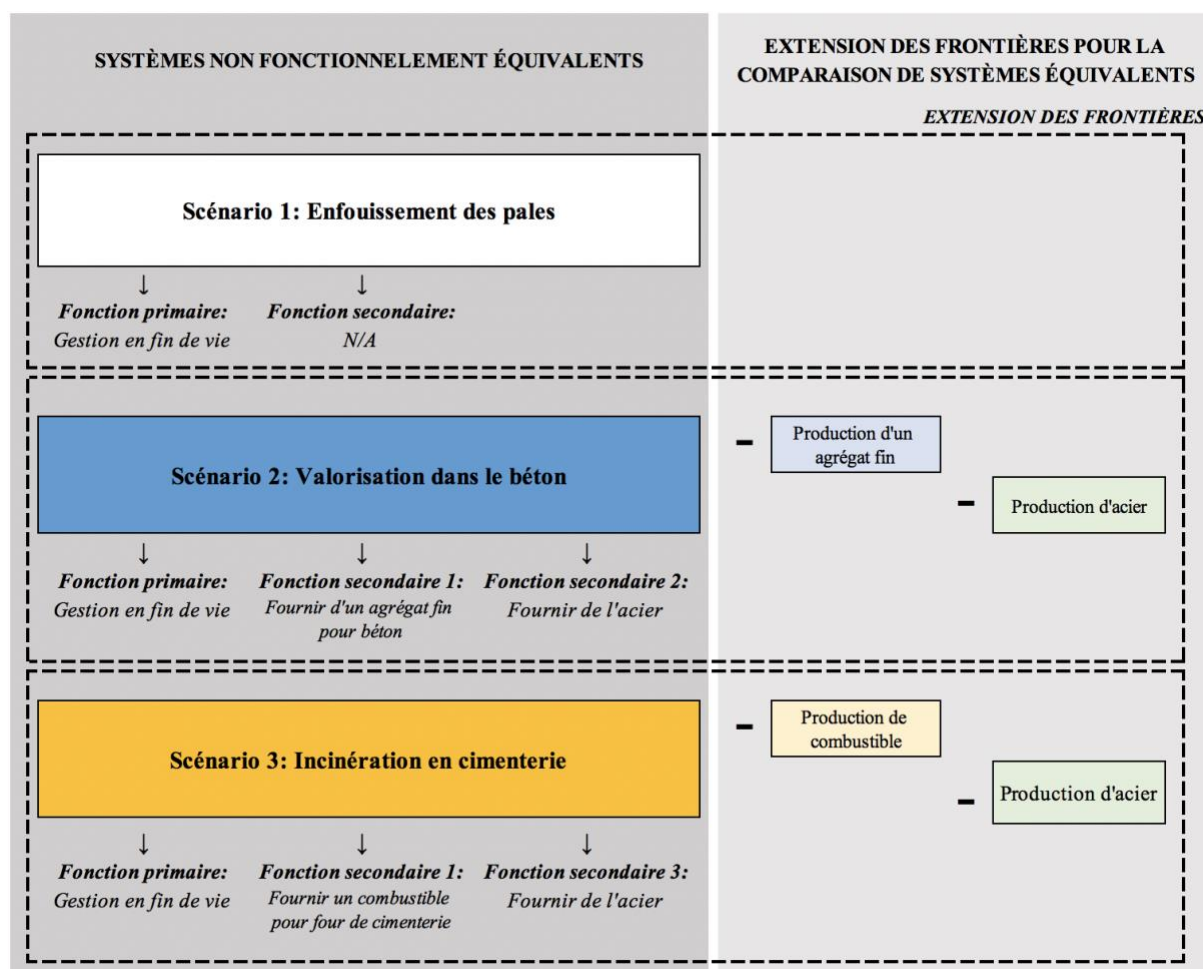


Figure 4.4 Extension des frontières des scénarios

## 4.4 Champs de l'étude

Cette section présente les processus et les flux qui seront considérés dans l'étude par la délimitation des frontières du système. Le cycle de vie d'un produit peut être divisé en quatre phases distinctes, soit l'extraction des matières premières, la fabrication des pales en tant que telle, la phase d'usage en incluant la maintenance et la fin de vie. Dans cette étude, le but est de comparer différents scénarios de traitement des pales d'éoliennes désuètes. Ainsi, la seule phase qui est considérée est la fin de vie. Selon la norme, il est aussi possible d'exclure les étapes qui sont identiques entre les scénarios, par exemple la production des pales ou bien le démantèlement sur le site du parc éolien, car les impacts seront les mêmes.

De telle manière, les frontières du système commencent une fois que le camion quitte le parc éolien après le démantèlement et se terminent lorsque les pales sont éliminées définitivement ou bien quand le produit généré est prêt pour son nouvel usage. C'est ce que montre la figure 4.5 à la page suivante.

Les principales étapes comprises dans l'étude sont les suivantes :

1. Le transport du parc éolien jusqu'au lieu de traitement (peut inclure plus d'un trajet avant de sortir des limites) ;
2. La gestion de fin de vie en tant que telle des pales pour les scénarios à l'étude.

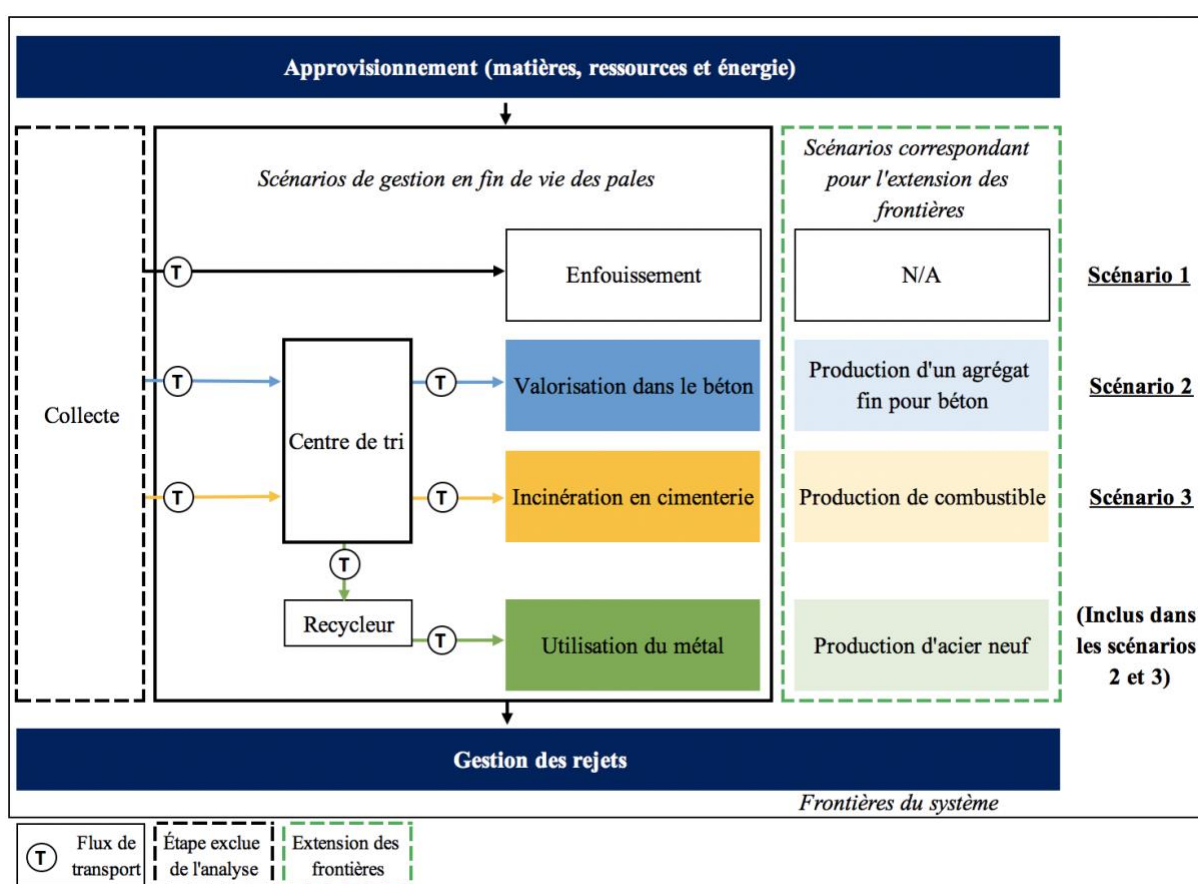


Figure 4.5 Frontières des systèmes



#### **4.5 Frontières géographique et temporelle**

Cette étude est une représentation du contexte de l'Est-du-Québec lors de l'année 2018. Les scénarios de gestion en fin de vie ont donc été élaborés en tenant compte de cette réalité. Bien que les parcs éoliens actuellement en service sur le territoire seront démantelés sur un horizon de 25 ans, il n'est pas possible d'évaluer les variations technologiques qui influenceront l'impact environnemental. Par exemple, l'amélioration de la performance des camions pour le transport ou bien le changement dans la fabrication des pales sont des avenues possibles. Pour ces motifs, cette étude se base sur les données les plus à jour possible.

## **5. INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE (ICV)**

Cette section intervient dans le but de clarifier de manière explicite la collecte de données pour l'ACV. Ainsi, dans un souci de clarté, les calculs et hypothèses nécessaires quant aux volumes et aux distances sont présentés.

### **5.1 Sources de l'inventaire utilisé**

Les informations recherchées servent principalement à modéliser trois types de flux : les matières premières, l'énergie consommée et les rejets de chaque procédé. Ces flux sont considérés pour chacune des étapes du cycle de vie. Pour être le plus fidèle possible à la réalité régionale, des efforts ont été faits pour recueillir le plus d'information primaire possible. Ces démarches ont été réalisées en collaboration avec Synergie Matanie, des acteurs locaux et l'Université de Sherbrooke.

Cependant, il n'est pas possible de rassembler toutes les données nécessaires à l'étude de manière primaire. Les données manquantes ont alors été recueillies de façon secondaire, par le biais de recherches bibliographiques dans la littérature, des données publiées par le TechnoCentre éolien (aujourd'hui Nergica) ainsi que des publications du gouvernement du Québec. La base de données Ecoinvent version 3.4 a servi à modéliser les différents processus restants. Les données ont été sélectionnées selon la représentativité temporelle, géographique et technologique. De ce fait, celles relatives à l'énergie dépeignent les mix énergétiques québécois et nord-américain. La modélisation des processus a été réalisée en utilisant le logiciel SimaPro (version Faculty 8.5.0.0) de la firme PRé Consultants des Pays-Bas. Le tableau 5.1 présente les principales sources des données de l'inventaire selon les différents flux inclus dans l'étude.

### **5.2 Analyse des flux de matières des scénarios**

L'évaluation environnementale des scénarios repose en grande partie sur la production qui est évitée par la valorisation des pales. Chaque étape de traitement possède un taux de rendement et génère une certaine quantité de pertes. Ainsi, il est nécessaire d'effectuer une analyse des flux de matières pour chaque scénario pour attribuer un crédit environnemental représentatif en fin de compte. Pour ce qui est du scénario 1, l'enfouissement, il n'est pas présenté, car l'ensemble du volume se retrouve directement dans un LET et n'est pas valorisé.

#### **5.2.1 Analyse des flux de matières du scénario 2**

Les trois scénarios commencent par le démantèlement des pales sur le site et par la préparation pour le transport. Cette étape est exclue de la caractérisation, car la norme permet d'exclure de l'étude ce qui est identique entre les scénarios comparés. Par ailleurs, elle produira inmanquablement une certaine



proportion de pertes dans l'analyse des flux de matières. Les pertes seront expliquées dans la section sur les limites de l'étude. Il est établi qu'elles sont envoyées au dépotoir.

**Tableau 5.1 Principales sources des données de l'inventaire**

Données	Description des flux	Sources
Volumes et composition des pales	Volume total dans la région désignée	(TechnoCentre éolien, 2018) (Albers et al., 2009)
	Composition des pales	Jugement d'expert : Communication avec un manufacturier de pales de la région (L. Massicotte, courriel, 21 février 2018)
Modélisation du transport	Distance de transport	(TechnoCentre éolien, 2018) (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MDDELCC], 2016)
		Calculateur de distance
	Impact du transport par camion	Ecoinvent version 3.4
Enfouissement des pales	Impact de l'enfouissement des pales	Ecoinvent version 3.4
Valorisation des pales dans le béton	Matières substituées et technologies de production	(Correia et al., 2011)
	Infrastructure, consommation énergétique et processus évités	Ecoinvent version 3.4
Incinération en cimenterie	Matières substituées, technologies de production, taux de rejet et valeur calorifique	(Schmidl, s. d.)
	Infrastructure, consommation énergétique et processus évités	Ecoinvent version 3.4

Par la suite, les scénarios 2 et 3 comportent des éléments communs. Dans ce cas, comme le scénario de l'enfouissement ne contient pas ces étapes, il est nécessaire de les inclure. Il s'agit du traitement des pales au centre de tri et du recyclage du métal. Le volume de métal qu'il est possible de recycler l'est grâce à la séparation au centre de tri. Ce volume est le même pour les deux scénarios en raison des étapes de traitement qui sont identiques jusqu'à ce point. Le volume de métal qui est envoyé au recyclage est donc de 694 tonnes.

Le volume restant est ensuite dirigé vers le mode de traitement propre à chaque scénario. Dans ce cas, le volume est expédié chez le producteur de béton, où il sera encore une fois broyé pour fournir un agrégat fin. C'est pourquoi le volume de sable qu'il est possible de substituer pour le volume total de pale à l'étude est de 16 663 tonnes. La figure 5.1 représente de façon schématique ce qui a été énoncé dans cette section.

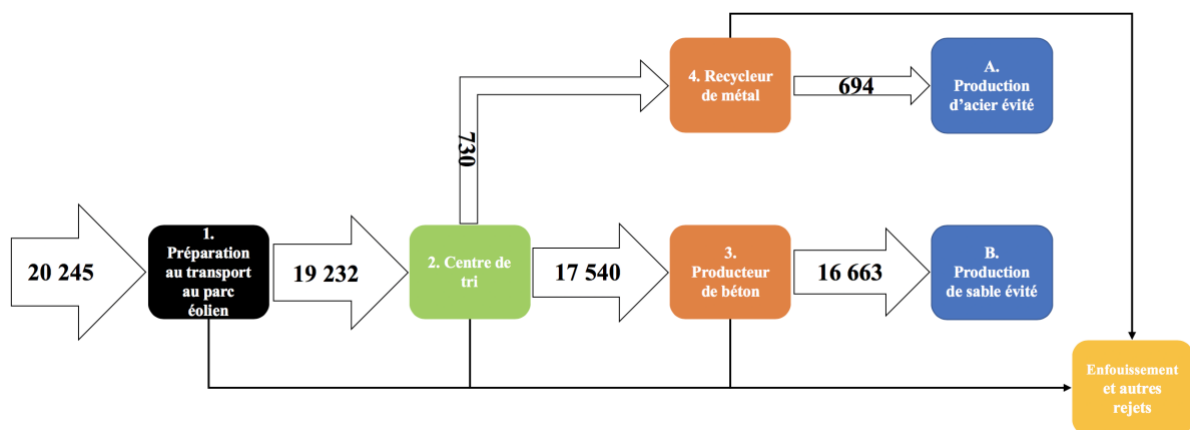


Figure 5.1 Analyse des flux de matières du scénario 2 (en tonnes)

### 5.2.2 Analyse des flux de matières du scénario 3

Pour ce qui est du scénario 3, le volume qui quitte le centre de tri est envoyé à la cimenterie pour servir de carburant alternatif. Une fois les pales dans le four de préchauffage, la moitié du volume se transformera en énergie et l'autre moitié sera de la cendre résultante. Dans cette étude, il est considéré que le volume de cendre résultant sera envoyé à l'enfouissement, en raison de la réticence des cimentiers québécois interroger dans ce projet. Ainsi, le crédit environnemental de ce scénario est attribuable au carburant fossile qui est substitué par les pales. Dans l'hypothèse où le carburant substitué est le charbon, le volume sera la moitié de celui des pales, à cause de leur valeur calorifique respective (Schmidl, s. d.). En conséquence, le volume de charbon substitué est de 4 166 tonnes. La figure 5.2 présente l'analyse des flux de matières pour ce scénario.

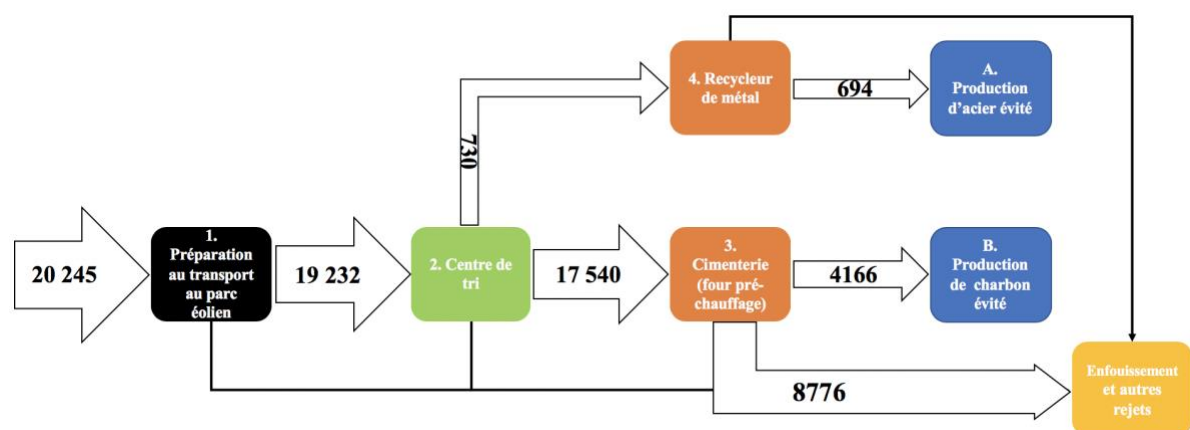


Figure 5.2 Analyse des flux de matières du scénario 3 (en tonnes)

### 5.3 Évaluation des distances de transport

Le tableau 5.2 présente les distances entre les parcs éoliens de la région désignée et les centres de traitement potentiels considérés dans cette étude. Ils sont classés en fonction de la puissance, et donc,

selon les volumes de pales d'éoliennes à traiter. Les distances en vert sont les plus courtes et les distances en rouge sont les plus longues. Elles ont été évaluées à vol d'oiseau depuis le point central approximatif de chaque parc éolien. Il est possible de remarquer que les centres de traitement situés à Matane sont les plus rapprochés de la plupart des parcs éoliens d'une grande capacité. Un calcul d'optimisation avec la fonction objective de réduire les distances de transport vers les LET permet de déterminer que 52 % des volumes devraient se diriger vers Matane, 32 % vers Gaspé et 16 % vers Saint-Alphonse.

Il est possible de remarquer qu'il existe une grande variabilité entre les distances. La plus courte est de huit kilomètres et la plus longue est de 238 kilomètres. De ce fait, une analyse de sensibilité sera nécessaire pour vérifier si le transport a une influence significative sur les résultats. Pour ce faire, les distances maximales possibles sont considérées dans l'évaluation des impacts potentiels. Les distances minimales seront ensuite évaluées pour faire la comparaison dans les analyses subséquentes. Certains scénarios comportent plus d'un transport, ce qui peut faire augmenter le kilométrage considérablement.

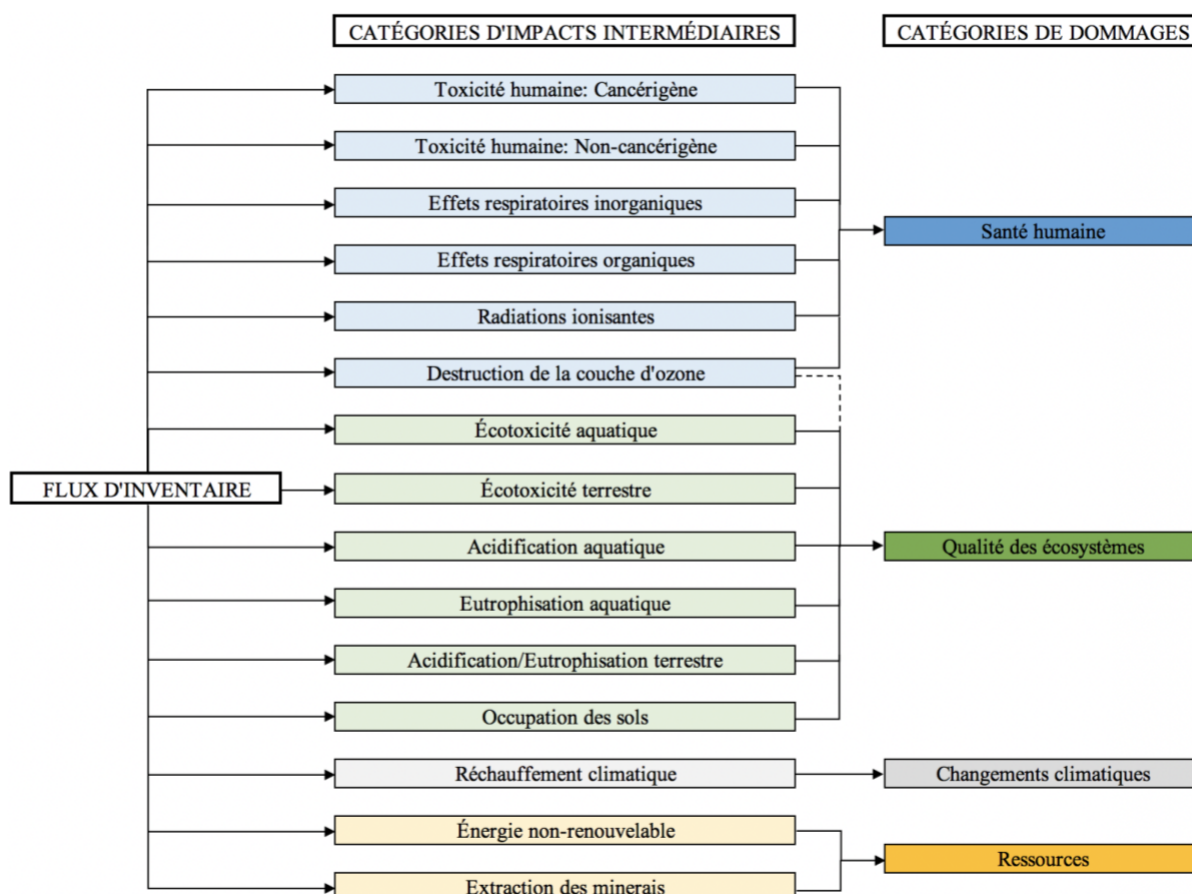
**Tableau 5.2 Distances (en kilomètres) entre les parcs éoliens et les lieux de traitement potentiels**  
(compilation d'après : TechnoCentre éolien, 2018 et MDDELCC, 2016)

Parc éolien	Puissance (MW)	LET Matane	Centre de tri et producteur de béton (Matane)	LET ST-Alphonse	Cimenterie (Port-Daniel-Gascons)	LET Gaspé
Lac-Alfred	300	49	51	160	211	233
Gros-Morne	212	161	161	118	120	70
Mesgi'g Ugju's'n	149	89	90	83	134	166
Le Plateau	139	87	88	138	190	225
St-Ulric-St-Léandre	133	11	12	161	209	218
Carleton	110	126	127	38	89	129
Baie-des-Sables	110	25	26	177	225	236
Vents du Kempt	101	66	67	112	163	190
Mont-Louis	101	146	146	117	125	83
L'Anse-à-Valleau	101	215	216	126	103	28
Roncevaux	75	77	78	133	185	218
Mont-Rothery	74	162	162	93	94	54
New Richmond	68	154	155	8	57	103
Montagne Sèche	59	195	195	124	110	43
Nordais (Cap-Chat)	57	68	67	131	166	154
Mont Copper	54	149	149	89	97	66
Mont Miller	54	154	154	90	95	61
Nordais (Matane)	42	14	15	148	194	199
La Mitis	25	54	55	165	216	238
Saint-Damase	24	30	31	174	223	236
Le Plateau 2	21	85	86	137	189	224
Des Moulins 2	21	100	102	136	188	228
Rivière-au-Renard	4	229	229	127	96	22

#### 5.4 Méthode d'évaluation des impacts environnementaux et indicateurs

La méthode de calcul IMPACT 2002+ version 2.14 a été retenue. Elle permet une évaluation à deux niveaux. Premièrement, quinze indicateurs intermédiaires sont obtenus à partir des flux de l'ICV. Ces indicateurs sont ensuite agrégés ensemble pour produire des catégories de dommages potentiels sur

l'environnement. Plus précisément, celles à l'étude sont la santé humaine, la qualité des écosystèmes, les changements climatiques et l'utilisation des ressources non renouvelables. Pour avoir une meilleure idée de ce que chacune contient, la figure 5.3 présente chacune des indicateurs intermédiaires qui entre dans le calcul et à quelle catégorie de dommages potentiels ils sont affectés.



**Figure 5.3** Méthode de calcul IMPACT 2002+ V.2.14 (adapté de : Jolliet, Saadé, Crettaz et Shaked, 2010)

## 6. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cette section présente les résultats de l'ACV. Elle commence en évaluant les trois scénarios à l'étude les uns par rapport aux autres. Une analyse de contribution est réalisée pour les scénarios 2 et 3 dans le but d'identifier les étapes du cycle de vie et les paramètres principaux les plus significatifs au niveau des impacts environnementaux potentiels. Une fois les résultats présentés, des analyses de sensibilité sont nécessaires pour vérifier l'impact de certains choix de la modélisation.

### 6.1 Valorisation dans le béton

L'analyse de contribution par scénario est faite pour les catégories de dommages seulement. Les résultats pour les impacts intermédiaires seront discutés dans la section sur la comparaison de différents scénarios. Cette ACV se concentre uniquement sur l'étape de fin de vie d'un cycle de vie conventionnel. De ce fait, la modélisation a nécessité la création d'étapes incluses dans celle de la fin de vie pour faciliter l'interprétation des résultats. Concrètement, les quatre étapes sont la production, l'utilisation, la fin de vie et les processus évités. Le tableau 6.1 présente une description de ce que contient chaque étape dans le cadre de cette étude.

**Tableau 6.1 Étapes du cycle de vie de la phase de fin de vie**

Étapes du cycle de vie	Description
Production	Passage des pales au centre de tri (inclus le transport, les infrastructures et l'énergie consommée)
Utilisation	Transformation de la matière pour obtenir un produit utilisable (inclus le transport, les infrastructures et l'énergie consommée)
Fin de vie	Émissions (air/eau/sol) des procédés de traitement et pertes de rendement à chaque étape
Processus évités	L'ensemble des étapes menant à la production des produits évités par chaque scénario

Les résultats sont présentés dans l'analyse de contribution en fonction des étapes du cycle de vie. Pour chacune des catégories de dommages, l'étape avec la plus grande contribution est identifiée. Par la suite, le processus et la substance les plus dommageables sont déterminés. C'est ce qui a été fait pour les scénarios 2 et 3, une fois pour les étapes de production, utilisation et fin de vie et une autre fois pour l'étape des processus évités seulement. Cela donne une représentation distincte entre les grands contributeurs du traitement des pales et ceux du crédit environnemental.

À la lumière des résultats, une tendance émerge clairement. C'est l'étape de production qui est la plus importante des différentes catégories de dommages du scénario 2 de valorisation dans le béton. C'est le cas pour la qualité des écosystèmes, les changements climatiques et l'épuisement des ressources. Les processus les plus significatifs pour chacune des catégories sont reliés au transport. Il s'agit des

émissions de l'usure des pneus des camions, du transport en tant que tel et du pétrole consommé. Les résultats indiquent une importance significative du transport dans les dommages potentiels sur l'environnement de ce scénario. Cela sera quantifié dans une analyse de sensibilité.

Pour ce qui est de la catégorie de dommages de la santé humaine, c'est l'étape de fin de vie qui est la plus élevée, mais encore suivie de près par l'étape de production. Dans ce cas, « Pertes du recyclage », un processus créé dans le cadre de cette étude pour englober les émissions à l'air, à l'eau et au sol du recyclage de l'acier, est le plus considérable. Les substances qui y contribuent le plus sont les hydrocarbures aromatiques (*Hydrocarbons, aromatic*) et les particules fines (PM<sub>2.5</sub>). Le tableau 6.2 présente les résultats de l'analyse de contribution pour le scénario de valorisation dans le béton, en excluant l'étape des processus évités.

**Tableau 6.2 Analyse de contribution pour la valorisation dans le béton**

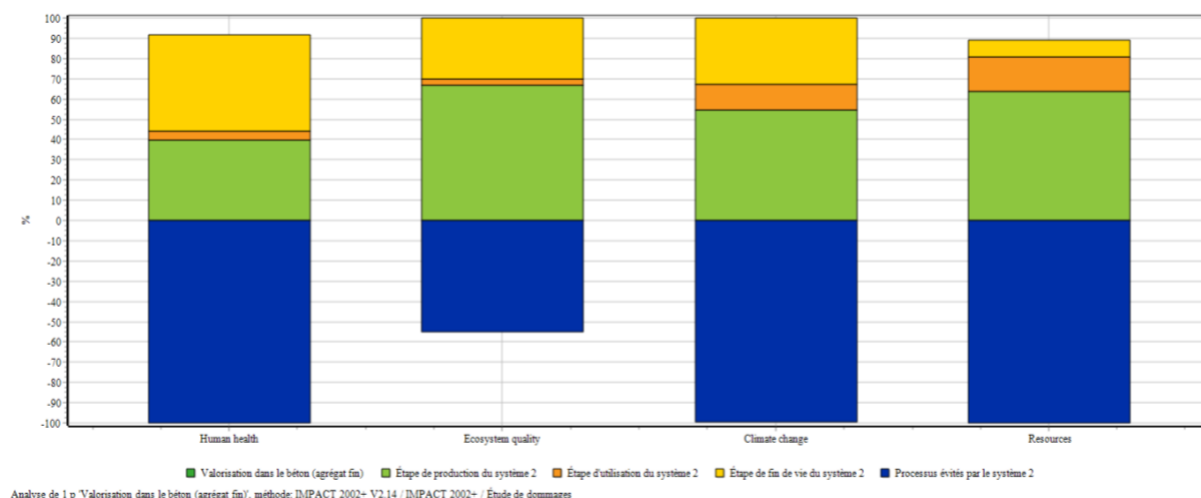
Catégorie de dommages	Étape du cycle de vie	Processus	Substances
Santé humaine	Fin de vie (52 %)	Pertes du recyclage	Hydrocarbons, aromatic PM <sub>2.5</sub>
Qualité des écosystèmes	Production (66,9 %)	Tyres wear emissions Blasting	Zinc (sol)
Changements climatiques	Production (54,5 %)	Transport	Carbon dioxide (fossil)
Ressources	Production (71,4 %)	Petroleum	Oil, crude

Le même exercice a été réalisé pour l'étape des processus évités seulement. Il ressort de cette analyse que les processus les plus significatifs sont « *Ferrochromium* » pour la santé humaine et la qualité des écosystèmes, « *Pig iron* » pour le changement climatique et « *Hard coal* » pour l'épuisement des ressources. Le tableau complet, incluant les substances à surveiller, est disponible à l'annexe 2.

Les figures présentant les résultats sont échelonnées en pourcentage de -100 % à 100 %. Ceci s'explique en raison des produits évités par les différents scénarios. Lorsqu'un pourcentage est négatif, cela veut dire que le crédit environnemental des processus évités est plus grand que les impacts du traitement en fin de vie. Autrement dit, plus un pourcentage se rapproche de -100 %, plus sa performance environnementale est bénéfique pour la catégorie d'impacts intermédiaires ou de dommages potentiels en question.

Dans la figure 6.1, le bleu représente les dommages évités par la méthode de traitement du scénario. Lorsque ce dernier atteint -100 %, cela signifie que les impacts potentiels sont soit nuls ou positifs pour cette catégorie de dommages. Pour le scénario de la valorisation dans le béton, c'est le cas pour la santé

humaine, les changements climatiques et l'épuisement des ressources. Seule la qualité des écosystèmes subit des dommages qui ne sont pas compensés par le produit évité. Il est possible de consulter le graphique des impacts intermédiaires, d'où proviennent les résultats de la figure 6.1, pour le scénario de valorisation dans le béton à l'annexe 2.



**Figure 6.1 Catégories de dommages pour la valorisation dans le béton**

## 6.2 Incinération en cimenterie

Les résultats pour le scénario 3 de l'incinération en cimenterie diffèrent du scénario 2. En effet, l'étape de production n'est pas la plus importante dans aucune des catégories. C'est plutôt la phase d'utilisation qui prend plus de place dans ce scénario. Elle est la catégorie la plus importante pour les catégories de dommages de la qualité des écosystèmes et de l'épuisement des ressources. Les émissions résultantes de l'usure des pneus des camions reviennent à l'étape d'utilisation pour la qualité des écosystèmes. Cela s'explique par le fait que la distance entre le centre de tri de Matane et la cimenterie de Port-Daniel est la plus grande dans cette étude avec 328 km. Les pertes du recyclage du métal et les particules fines qui sont générées sont, au même titre que pour le scénario 2, les plus dommageables pour la santé humaine pour ce scénario. Le processus de l'enfouissement est celui qui contribue le plus aux changements climatiques, cela s'explique par le volume élevé de cendre qui se retrouve dans un LET au bout du traitement comme il est modélisé dans ce projet. Le tableau 6.3 présente les résultats de l'analyse de contribution pour le scénario de l'incinération en cimenterie, en excluant la contribution de l'étape des processus évités.

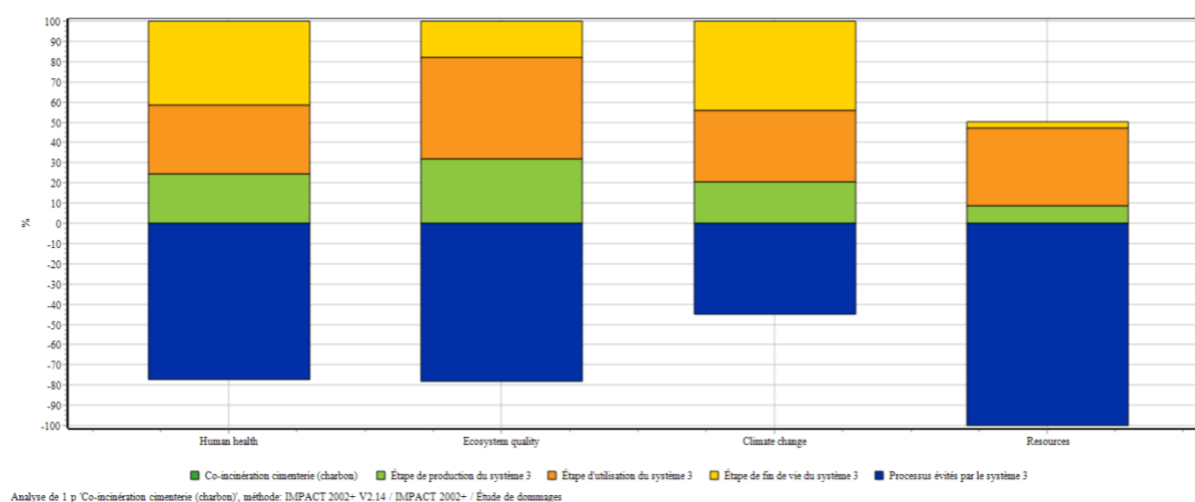
Encore une fois, le tableau pour l'étape des processus évités est disponible à l'annexe 2. Les processus « *Ferrochromium* » pour la santé humaine, « *Blasting* » la qualité des écosystèmes, « *Pig iron* » pour le changement climatique et « *Hard coal* » pour l'épuisement des ressources sont les plus significatifs. Cela est similaire aux résultats du scénario 2.



**Tableau 6.3 Analyse de contribution pour l'incinération en cimenterie**

Catégorie de dommages	Étape du cycle de vie	Processus	Substances
Santé humaine	Fin de vie (41,5 %)	Pertes du recyclage du métal	PM <sub>2.5</sub>
Qualité des écosystèmes	Utilisation (50,5 %)	Pertes du recyclage du métal Tyres wear emissions Blasting	Zinc (sol) Aluminium (air)
Changements climatiques	Fin de vie (44,2 %)	Enfouissement	Methane (biogenic)
Ressources	Utilisation (76,4 %)	Hard coal	Coal, hard

La figure 6.2 présente les résultats pour les étapes du cycle de vie des différentes catégories de dommages de l'incinération en cimenterie. Cette fois, il y a seulement une catégorie où l'étape des processus évités atteint -100 %. Il s'agit de l'épuisement des ressources et cela est attribuable au charbon (*Hard coal*), qui prend beaucoup d'importance dans la catégorie d'impacts intermédiaires des énergies non renouvelables qui entre dans le calcul de la catégorie de dommages. Il est possible de consulter le graphique des impacts intermédiaires pour le scénario de l'incinération en cimenterie à l'annexe 2.



**Figure 6.2 Catégories de dommages pour l'incinération en cimenterie**

### 6.3 Comparaison des scénarios

La comparaison des scénarios est l'aboutissement de la recherche et de la méthodologie présentées précédemment. C'est pourquoi, les impacts intermédiaires sont révélés en premier lieu dans cette section pour faciliter la compréhension des résultats agrégés que sont les dommages potentiels sur l'environnement.



### 6.3.1 Impacts intermédiaires

Les quinze catégories d'impacts intermédiaires dressent un portrait intéressant des nuances qui existent entre les différentes méthodes de traitement en fin de vie. Une attention particulière doit être portée aux comparaisons avec l'enfouissement, comme il s'agit du scénario qui représente la façon de faire actuelle. Un meilleur pointage sur les indicateurs des autres scénarios indiquerait une amélioration potentielle de la performance environnementale s'ils étaient adoptés.

Dans le cas de l'enfouissement, l'analyse des résultats d'impacts intermédiaires montre que ce scénario est le pire au niveau de quatre indicateurs, incluant le réchauffement climatique et l'acidification/eutrophisation terrestre. En contrepartie, il est quand même celui avec le moins d'impacts pour la toxicité humaine (cancérigènes).

Pour le scénario 2, la valorisation dans le béton, les résultats sont beaucoup plus concluants. En effet, ce scénario se classe premier dans plus de la moitié des indicateurs, un total de huit précisément. Ceux-ci incluent le réchauffement climatique et l'extraction des minerais. Il est malgré tout le pire au niveau de l'écotoxicité aquatique, par une faible marge. En comparaison avec l'enfouissement, ce dernier et la toxicité humaine : cancérigènes sont les deux seuls où le scénario 2 ne présente pas d'avantages.

Le portrait de l'incinération dans le béton, le scénario 3, est plus ambigu. Il est le plus respectueux de l'environnement pour deux indicateurs, énergie non renouvelable et eutrophisation aquatique, mais est le pire dans sept autres. Les résultats agrégés des catégories de dommages donneront une meilleure idée, car plusieurs se trouvent dans la catégorie de la santé humaine. Les impacts intermédiaires des trois scénarios (enfouissement des pales, valorisation dans le béton et l'incinération en cimenterie) sont présentés sur la figure 6.3.

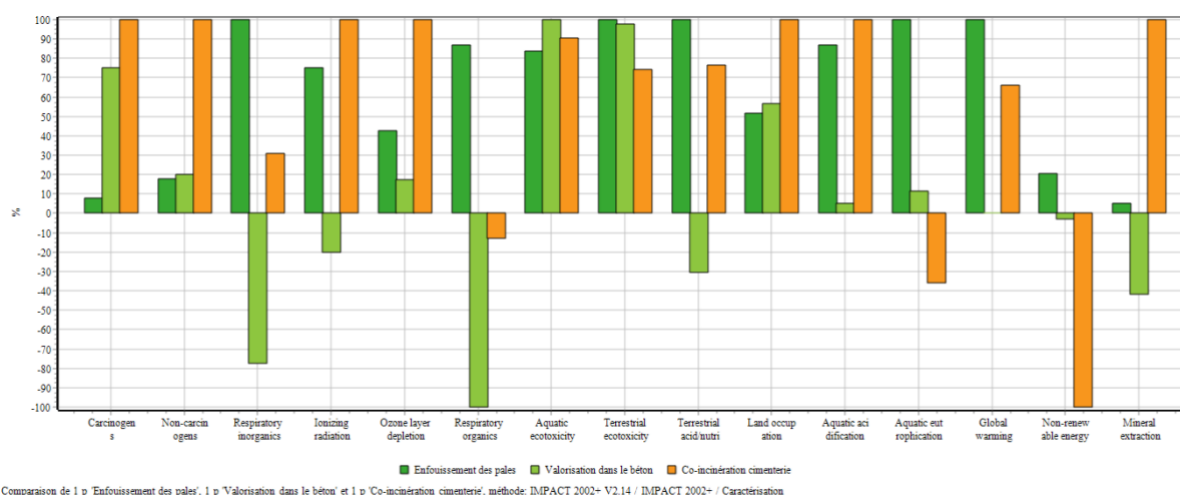


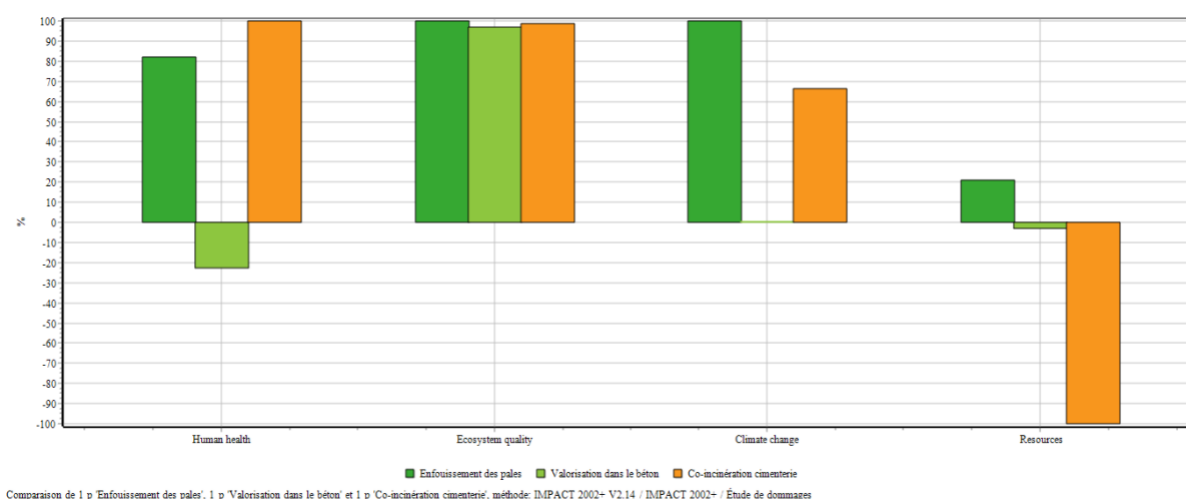
Figure 6.3 Comparaison des scénarios selon les impacts intermédiaires

### 6.3.2 Catégories de dommages

L'évaluation des différentes catégories de dommages servira de base pour les recommandations. L'agrégation des résultats offre une représentation simplifiée de celle des impacts intermédiaires. Il est possible de faire ressortir plusieurs constats de ces résultats. Encore une fois, la comparaison avec l'enfouissement est primordiale. Tout d'abord, il n'est pas possible de conclure quoi que ce soit au niveau de la catégorie de la qualité des écosystèmes en raison de l'écart marginal entre les scénarios, sinon qu'ils ont des dommages potentiels similaires. Néanmoins, aucune catégorie de dommages ne favorise l'enfouissement comme méthode de traitement prioritaire.

La valorisation dans le béton est le scénario qui performe le mieux dans deux catégories, soit la santé humaine et les changements climatiques. Par surcroît, le scénario 2 est considérablement supérieur à l'enfouissement sur tous les critères, sauf celui de la qualité des écosystèmes. D'ailleurs, sur ces trois catégories de dommages, les processus évités compensent les étapes de traitement en fin de vie.

Pour l'incinération en cimenterie, elle est indéniablement en première position pour la catégorie de l'épuisement des ressources. Par contre, le scénario 3 est le pire en ce qui a trait à la santé humaine. Par rapport à l'enfouissement, il y a une amélioration au niveau de la catégorie des changements climatiques, mais moins que le scénario 2. Les catégories de dommages des scénarios sont visibles à la figure 6.4.



**Figure 6.4 Comparaison des scénarios selon les catégories de dommages potentiels**

### 6.4 Analyse de sensibilité

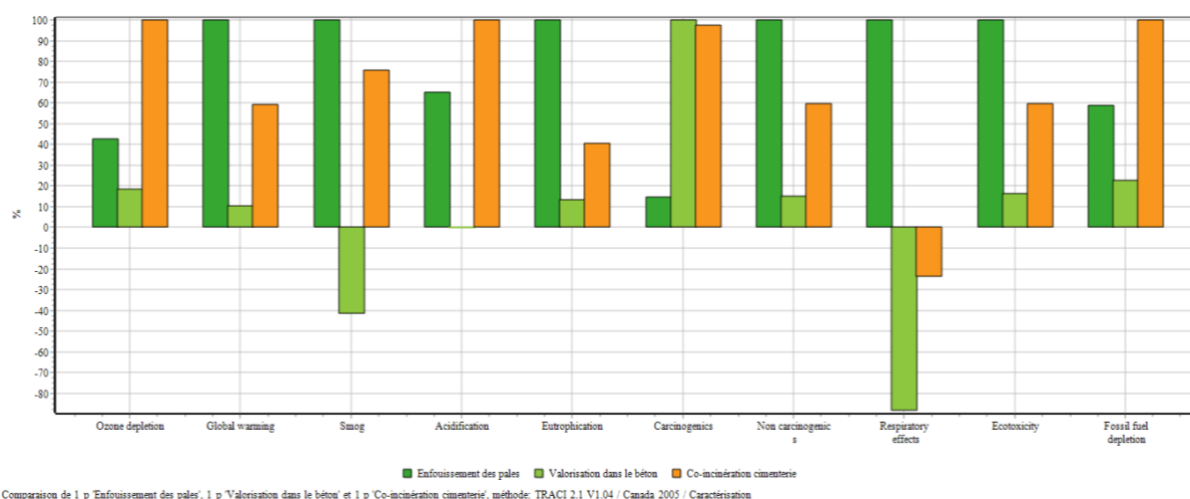
Pour affermir les résultats présentés précédemment, quatre analyses de sensibilité sont réalisées. La première consiste à changer la méthode de calcul et les trois autres sont faites selon des éléments critiques que l'analyse a fait ressortir. Il s'agit des distances de transport, du choix du processus pour le recyclage du métal et aussi le choix du produit évité pour le scénario de valorisation dans le béton.

### 6.4.1 Selon la méthode de calcul

La méthode de calcul qui est utilisée pour cette analyse est TRACI 2.1 V1.04/Canada 2005. Elle comporte dix catégories d'impacts intermédiaires qui sont différents de la méthode utilisée précédemment. L'analyse de sensibilité sert à valider si les mêmes étapes du cycle de vie sont les plus dommageables et par la suite une nouvelle comparaison des scénarios est effectuée.

Pour le scénario de valorisation dans le béton, la fin de vie est la plus importante dans cinq des catégories de dommages intermédiaires. L'étape de production est aussi significative avec quatre catégories. Ce sont les deux mêmes catégories qui ressortent le plus avec niveau des dommages pour la méthode de calcul IMPACT 2002+, sauf que l'étape de fin de vie est plus présente. Par exemple, dans les résultats initiaux de la catégorie de dommages changements climatiques, c'est l'étape de production qui domine, alors que pour l'indicateur du réchauffement climatique dans la méthode TRACI, c'est la fin de vie qui est la plus importante. Le graphique pour le scénario 2 est disponible à l'annexe 3. Pour ce qui est de l'incinération en cimenterie, les tendances sont les mêmes pour les deux méthodes de calcul. C'est-à-dire que les phases d'utilisation et de fin de vie se séparent en parts égales les différents indicateurs. Le graphique est aussi disponible à l'annexe 3.

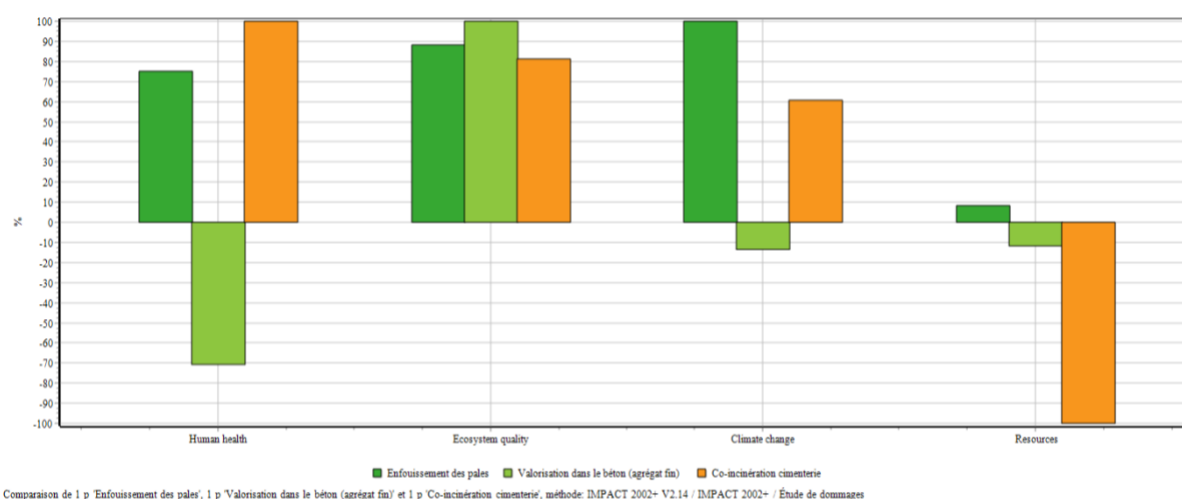
Pour la comparaison entre les scénarios, visible à la figure 6.5, le résultat est encore plus convaincant pour le scénario 2 de la valorisation dans le béton. Ce dernier présente la meilleure performance dans pas moins de neuf indicateurs sur dix. Par contre, cela devient moins clair pour le scénario 3 de l'incinération en cimenterie. Il performe mieux que l'enfouissement dans seulement six indicateurs. De plus, il peut être considéré comme le pire dans les quatre autres. Néanmoins, c'est toujours l'enfouissement qui présente la performance globale la moins intéressante au niveau environnemental. Bref, les conclusions émises avec la méthode de calcul IMPACT 2002+ tiennent pour autant.



**Figure 6.5 Comparaison des scénarios selon la méthode de calcul TRACI 2.1**

### 6.4.2 Modification des distances de transport

Pour vérifier la contribution du transport sur les résultats de l'étude, l'hypothèse a été posée d'utiliser initialement les distances maximales possibles pour chaque scénario. Pour faire cette analyse de sensibilité, les distances minimales seront appliquées pour constater leurs influences sur les résultats. En comparant la figure 6.4 et la figure 6.6, il est possible de voir plusieurs différences. Tout d'abord, une amélioration de presque 50 % de la performance du scénario 2 pour le critère de la santé humaine et de 12 % pour le critère des changements climatiques par rapport aux autres. Pourtant, pour l'indicateur de la qualité des écosystèmes, il est maintenant possible de statuer sur le fait que le scénario de valorisation dans le béton est le pire à cet effet et que celui de l'incinération est le meilleur. Ainsi, il est possible de voir que le transport a une influence certaine sur les résultats de cette ACV.



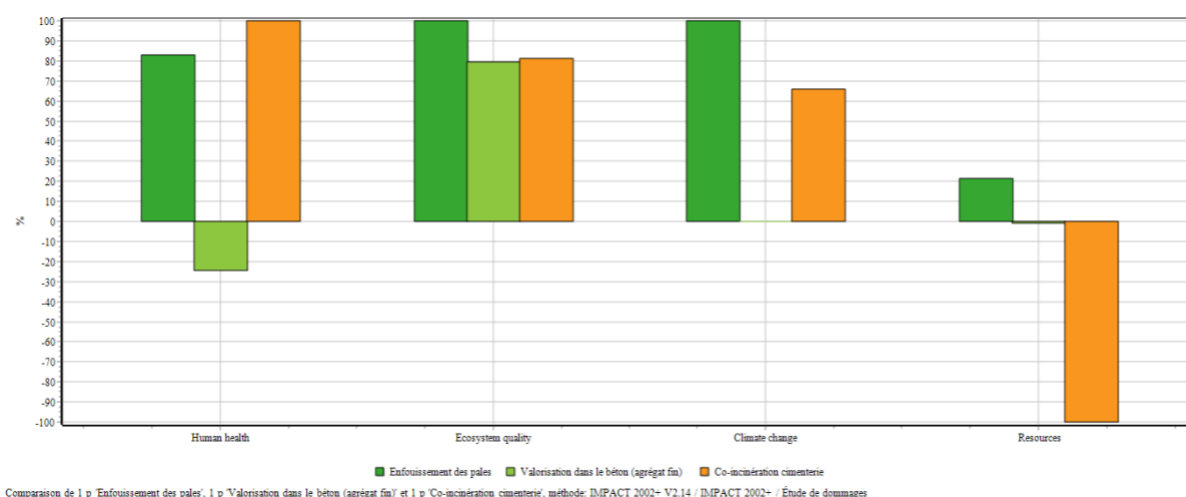
**Figure 6.6 Comparaison des scénarios avec les distances de transport minimales**

Pour savoir jusqu'à quelle distance il est préférable de favoriser un des scénarios à l'enfouissement, les distances de transport ont été rapportées à zéro. Par la suite, la comparaison s'est faite en utilisant la catégorie de dommages des changements climatiques. Pour être avantageusement comparable face à l'enfouissement à ce niveau, l'ensemble des transports ne devrait pas dépasser 1694 km pour le scénario de la valorisation dans le béton et 906 km pour le scénario de l'incinération en cimenterie.

### 6.4.3 Modification du métal sélectionné

Dans l'analyse de contribution, la production de l'acier est représentée de façon importante pour une matière qui représente moins de 4 % de la masse totale des pales. C'est principalement à cause du processus des pertes du recyclage dans les catégories d'impact de la santé humaine et de la qualité des écosystèmes. L'acier sélectionné pour modéliser ces émissions est un acier faiblement allié produit avec un mix énergétique québécois. Il existe d'autres aciers dans la banque de données Ecoinvent version 3.4. De ce fait, il est intéressant de comparer avec le même type d'acier, mais produit avec un mix

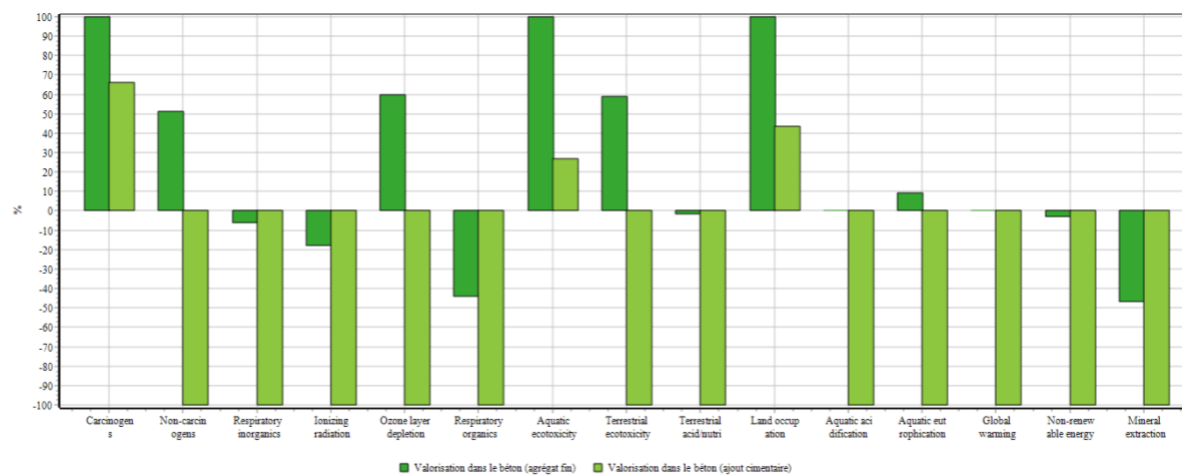
énergétique différent. En comparant avec un acier faiblement allié produit avec un mix énergétique européen, l'indicateur de la qualité des écosystèmes est grandement amélioré pour les scénarios 2 et 3. Si bien qu'il est possible d'affirmer que les deux performant mieux que l'enfouissement pour cet indicateur. Cela signifie aussi que le scénario de valorisation pour le béton est supérieur à l'enfouissement dans les quatre catégories de dommages à l'étude. Sinon, aucune autre modification majeure ne découle de cette modification. C'est ce que démontre la figure 6.7.



**Figure 6.7 Comparaison des scénarios avec modification de l'acier**

#### 6.4.4 Produit substitué pour le scénario 2

Une des applications potentielles discutées dans l'état des connaissances pour la valorisation dans le béton est la substitution comme ajout cimentaire. Dans le cadre de cette étude, il est considéré que les pales seront broyées finement pour produire un agrégat fin qui substituera du sable dans le béton. Le fait de pouvoir substituer du ciment aurait un effet important sur le crédit environnemental de ce scénario. Pour l'exercice, le sable a été remplacé par du ciment Portland pour l'étape des processus évités, sans ajouter de transformation supplémentaire. Néanmoins, le taux de substitution peut être différent selon les deux produits. Dans l'étude sur la commercialisation du verre, il est considéré que 1 kg de poudre de verre remplace 1,02 kg de sable (Lupien, 2006). Pour le ciment, 0,985 kg de poudre de verre remplace 1,22 kg de ciment Portland (Portland Cement Association [PCA], 2013). Donc, le volume substitué passe de 16 663 tonnes de sable à 20 629 tonnes de ciment Portland. La figure 6.8 montre une comparaison du scénario de valorisation dans le béton selon les processus évités. La valorisation comme ajout cimentaire procure une valeur ajoutée environnementale considérable sur tous les indicateurs d'impacts intermédiaires.



Comparaison de 1 p 'Valorisation dans le béton (agrégat fin)' avec 1 p 'Valorisation dans le béton (ajout cimentaire)', méthode IMPACT 2002+ V2.14 / IMPACT 2002+ / Caractérisation

**Figure 6.8 Comparaison de la valorisation dans le béton selon les processus évités**

## 7. LIMITES DE L'ÉTUDE

Les limites de cette étude se trouvent avant tout au niveau de l'inventaire. Les procédés modélisés par les scénarios ne sont pas en exploitation à l'échelle industrielle à l'heure actuelle au Québec. Ceci étant dit, de nombreuses hypothèses ont dû être posées. Elles touchent principalement les pertes de rendement, les taux de rejets à chaque étape de traitement et les émissions des procédés. Une caractérisation plus approfondie que ce qu'il a été possible de faire dans cette étude améliorerait la précision des résultats et serait plus représentative de la réalité.

À plusieurs reprises, la base de données Ecoinvent version 3.4 ne possédait pas directement les procédés nécessaires à la modélisation des scénarios. Ainsi, il est nécessaire d'adapter ces procédés pour les rapprocher des besoins de l'étude. Par exemple pour améliorer la représentativité géographique en changeait le mix énergétique pour qu'il soit représentatif du Québec. Bien qu'il soit aisé de modifier les quantités qui entrent dans un procédé, il n'est pas possible de modifier les émissions qui en sortent aussi facilement. Ainsi, il existe une incertitude au niveau des émissions de plusieurs procédés.

Pour assurer un contrôle de qualité des données utilisées pour cette étude, une technique consiste à faire un ratio entre un bilan énergétique et un bilan du CO<sub>2</sub>. Au niveau énergétique, ce sont exclusivement les énergies primaires non renouvelables qui sont considérées. Pour ce qui est du bilan de CO<sub>2</sub>, il est important de noter que les valeurs de CO<sub>2</sub> équivalent sont rapportées sur une période de 100 ans selon les ratios de conversion de l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Le rapport gCO<sub>2eq</sub>/MJ devrait en principe se situer entre 0 et 100 pour conclure que l'étude possède des données de qualité. L'exercice a été réalisé en deux parties. Premièrement, pour les étapes de valorisation des pales pour les scénarios 2 et 3 et ensuite deuxièmement seulement pour les processus évités. Le tableau 7.1 présente les résultats de ces calculs de ratios arrondis à l'unité près. Il est possible de voir que les ratios pour les étapes de valorisation sont supérieurs à 100, ce qui indique une certaine faiblesse dans la qualité des données. Au niveau des processus évités, un aspect critique de la modélisation, les ratios se trouvent bel et bien entre 0 et 100, ce qui assure la qualité des données.

**Tableau 7.1** Contrôle de la qualité des données selon le bilan énergétique et de CO<sub>2</sub>

Scénarios	Valorisation	Processus évités
Valorisation dans le béton	191	84
Incinération en cimenterie	153	16

Pour identifier les points où la qualité des données pourrait être améliorée, une analyse qualitative de ces dernières est réalisée. Pour ce faire, les données sont évaluées selon quatre niveaux par rapport à leur fiabilité et leur représentativité. Le critère de la fiabilité concerne surtout l'analyse des flux de matières. Une donnée fiable a été validée auprès de sources dans la littérature ou d'acteurs sur le terrain.

La représentativité est évaluée en fonction du contexte de l'étude. Cela est aussi considéré du point de vue de la géographie, de la temporalité et de la technologie. Ce critère était la base de la réflexion quant aux choix des processus dans la base de données Ecoinvent version 3.4. Le tableau 7.2 présente les critères d'évaluation des données ainsi que l'échelle qui s'applique à chacun.

**Tableau 7.2 Critères d'évaluation de la qualité des données** (inspiré de : Quantis, 2015)

Qualité	Fiabilité		Représentativité		Commentaire
Haute qualité	1	Donnée spécifique calculée ou validée	1	Bonne représentativité géographique et technologique	Satisfait à des standards de haute qualité
Qualité acceptable	2	Donnée calculée ou validée d'une autre source	2	Représentativité géographique ou technologique raisonnable	Satisfait à des standards de qualité moyenne
Qualité minimale	3	Estimation qualifiée	3	Manque de représentativité géographique et technologique	Satisfait à des standards de qualité minimum
Basse qualité	4	Estimation grossière	4	Approximation	Nécessiterait une amélioration

Le tableau 7.3 quant à lui, dresse la liste des différentes données utilisées dans l'étude. Seules celles qui posent problème, c'est-à-dire avec un score de 3 ou 4, seront discutées dans cette section. Pour commencer, chaque scénario contient des taux de rejets et de rendement qu'il n'a pas été possible de mesurer sur le terrain ou de valider dans la littérature. Pour cette raison, il est estimé que les taux de pertes sont de 5 % à chaque étape du traitement. Selon certaines études, des taux de pertes entre 1,5 % et 3,5 % étaient appliqués à certaines étapes (Quantis, 2015). De ce fait, le principe de précaution est appliqué avec un taux plus élevé, qui diminue le crédit environnemental pour les produits substitués en bout de ligne. C'est pourquoi le score pour la fiabilité est de 4. Il en est de même au niveau de la représentativité, car il est simplement estimé que ces pertes se retrouvent à l'enfouissement.

Pour ce qui est des critères avec le score de 3, les distances de transport du centre de tri à la fonderie sont estimées dans une logique de proximité. La fiabilité en est diminuée. La distance varie entre les deux fonderies les plus proches du centre de tri et utilisées comme destination pour le métal recyclé avec un transport par camion. Néanmoins, il est possible que le fournisseur de services décide d'envoyer le métal plus loin, voir à l'étranger, en raison des lois du marché.

La représentativité des émissions de l'opération d'incinération mériterait aussi une amélioration. Comme il a été mentionné précédemment, il est facile de modifier un volume entrant, mais il est difficile de faire une corrélation directe avec les émissions en fin de compte. Pour l'enfouissement, le processus modélisé est représentatif des ordures ménagères au Québec. Cela signifie que les émissions à



l'air/eau/sol ne sont pas directement celles des matières se trouvant dans les pales d'éoliennes. Finalement, aucune analyse d'incertitude de type Monte-Carlo n'a été réalisée dans le cadre de ce projet.

**Tableau 7.3 Évaluation qualitative de la qualité des données**

Étape du cycle de vie	Données	Fiabilité	Représentativité	Paramètre variable
Enfouissement (Scénario 1)				
Gestion de fin de vie	Distance jusqu'au lieu d'enfouissement	1	1	Oui
Toutes les filières de détournement de l'enfouissement (Scénarios 2 et 3)				
Découpe pré-transport	Taux de rejets	4	4	
Traitement au centre de tri	Distance jusqu'au centre de tri	1	1	Oui
	Opération de broyage des pales (consommation énergétique et infrastructure)	2	2	
	Taux de rejets	4	4	
Recyclage du métal	Distance jusqu'à la fonderie	3	1	Oui
	Refonte de l'acier (consommation énergétique et infrastructure)	2	2	
	Taux de rejets	4	4	
Valorisation dans le béton (Scénario 2)				
Production d'agrégat fin pour béton	Distance jusqu'à l'usine de production	1	1	Oui
	Opération de broyage fin (consommation énergétique et infrastructure)	2	2	
	Taux de rejets et rendement	4	4	
	Production du sable vierge substitué	2	1	
Incinération en cimenterie (Scénario 3)				
Production de carburant alternatif à four de cimenterie	Distance jusqu'à la cimenterie	1	1	Oui
	Opérations d'incinération (consommation énergétique et infrastructure)	2	2	
	Taux de rejets et rendement	4	4	
	Émissions (air, eau et sol)	2	3	
	Production du charbon substitué	2	2	

## 8. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Les recommandations de l'étude sont présentées dans cette section. Elles sont justifiées par les éléments de l'ACV et la recherche documentaire. Des pistes concernant les recherches futures sont aussi proposées. Avant de débiter, il est nécessaire de rappeler que l'étude considère des pales d'éoliennes composée en majorité de fibre de verre. Une fois arrivée en fin de vie, la fibre ne possède virtuellement aucune valeur commerciale en raison de l'importante perte de propriétés mécaniques et d'une valeur calorifique sous les standards de l'industrie pour la récupération d'énergie (Wind Europe, 2017).

### 8.1 Recommandations pour améliorer la gestion en fin de vie des pales éolienne

Dans le contexte économique de l'Est-du-Québec, et en considérant les volumes de pales déjà en service, il est possible d'émettre des recommandations visant à améliorer la performance environnementale du traitement en fin de vie :

- Le scénario de valorisation dans le béton comme agrégat fin possède la meilleure performance environnementale sur presque tous les indicateurs vis-à-vis des deux autres scénarios, sauf pour celui des ressources où c'est l'incinération en cimenterie. La multitude d'applications potentielles dans le béton, comme celle d'ajout cimentaire, permettrait d'accroître encore plus le bénéfice environnemental potentiel face à l'enfouissement.
- De telle sorte qu'un décideur devant disposer de pales d'éoliennes dans l'Est-du-Québec devrait favoriser les méthodes de traitement dans l'ordre suivant :
  1. Valorisation dans le béton comme agrégat fin;
  2. Incinération en cimenterie;
  3. Enfouissement.

Ces recommandations se basent sur la classification des performances des trois scénarios à l'étude selon les indicateurs de dommages présentées au tableau 8.1. Les méthodes de traitement en fin de vie à privilégier sont classées pour chaque catégorie de dommages. Le décideur peut choisir d'accorder plus ou moins d'importance à chacun, ce qui peut faire varier le choix. Il a été possible de faire ressortir quelques tendances plus générales des résultats de cette étude :

- Favoriser les méthodes de traitement en fin de vie avec le moins d'étapes possibles. Chaque étape nécessitant du transport, de l'énergie et des infrastructures, il devient moins évident de compenser efficacement les impacts par le produit substitué. Cela est sans compter les pertes de rendement qui sont inhérentes.

- Viser les applications qui substitue une matière avec un impact environnemental élevé, par exemple du ciment à la place du sable. Ceci permet d’atteindre les bénéfices environnementaux optimaux.

**Tableau 8.1 Classification des méthodes de traitement en fin de vie des pales**

Catégorie de dommages	Enfouissement	Valorisation dans le béton	Incinération en cimenterie
Santé humaine	2	1	3
Qualité des écosystèmes	Non concluant		
Changements climatiques	3	1	2
Ressources	3	2	1

Les distances de transport représentent un enjeu significatif dans cette étude. Si bien que pour réduire les impacts environnementaux potentiels, il faut chercher à minimiser les distances de transport. Une estimation de la distance maximale qu’il est possible de parcourir pour détourner les pales de l’enfouissement a été réalisée selon la catégorie de dommages des changements climatiques. Ainsi, avant que les bénéfices des scénarios soient estompés, il est envisageable de parcourir 1696 km pour la valorisation dans le béton et de 906 km pour l’incinération en cimenterie. Bien que cela semble beaucoup, il est important de rappeler que les scénarios 2 et 3 comportent plus d’un transport par camion. En fonction de la localisation du parc éolien, la somme peut se rapprocher de la distance maximale recommandée pour l’incinération en cimenterie. Le tableau 8.2 met l’accent sur ces distances.

**Tableau 8.2 Distances maximales pour éviter l’enfouissement (en kilomètres)**

Valorisation dans le béton	Incinération cimenterie
1696	906

Dans le cas où le niveau technologique ne permettrait pas encore de traiter les pales selon un des scénarios de valorisation, il est alors nécessaire de minimiser les distances de transport vers l’enfouissement. Une optimisation avec la fonction objective de réduire les distances de transport vers les LET a permis de déterminer que 52 % du volume devraient se diriger vers celui de Matane, 32 % vers celui de Gaspé et 16 % vers celui Saint-Alphonse dans la Baie-des-Chaleurs.

Finalement, une recommandation qui s’applique à tous les scénarios est de s’assurer de minimiser les pertes pendant la collecte sur le site. Un équipement fournissant une coupe plus franche qu’une pelle mécanique équipée d’une cisaille est à privilégier. De plus, au moment de broyer les pales au centre de tri, un système de récupération de la poussière permettrait de limiter les pertes.

## 8.2 Perspectives

Les matériaux qui entrent dans la composition des pales d'éoliennes sont variables et surtout, en constante évolution. Si l'utilisation de la fibre de carbone devient plus répandue, d'autres techniques de traitement en fin de vie seront alors viables économiquement, tels que la solvolysse. Cette fibre résiste mieux aux procédés à des températures élevées que la fibre de verre. L'évaluation environnementale de ces techniques serait ensuite intéressante pour les pales d'éoliennes.

Cette étude a été réalisée dans un souci de respect du contexte économique de l'Est-du-Québec et du niveau de technologie actuel. Les volumes de pales seront petit à petit envoyés dans une filière de gestion en fin de vie au cours des 20 à 25 prochaines années. En conséquence, il est possible que le contexte économique et le progrès technologique viennent rendre viables certaines techniques de recyclage qui n'ont pas fait l'objet d'une modélisation. Par exemple, si le législateur s'interroge sur les coûts d'enfouissement très bas ou bien en vient à considérer une interdiction d'enfouissement des matériaux composites. Une telle contrainte pourrait alimenter la créativité et la capacité d'adaptation des industries pour trouver des débouchés pour cette matière.

Avant que les pales d'éoliennes puissent être incorporées au béton, il faut poursuivre les recherches sur les propriétés des bétons résultants. Cela permettra l'inclusion de cette matière dans les normes de l'industrie et ainsi, son utilisation possible chez les producteurs. Néanmoins, même si une application est permise par les normes, il faudra développer les leviers économiques nécessaires pour en assurer la pérennité.

Les scénarios présentés dans cette étude sont des solutions à l'échelle industrielle qui permettraient de traiter l'ensemble du volume de 20 245 tonnes de pales dans les 20 prochaines années. Cependant, il serait intéressant d'investiguer davantage sur des applications de réemploi qui pourraient répondre à des problématiques régionales. D'ailleurs, des sommes importantes devront être déboursées pour la protection des berges dans les prochaines années. Une valeur ajoutée intéressante pour la région pourrait se trouver dans cette application potentielle énoncée dans l'état des connaissances.

## CONCLUSION

Un portrait de l'industrie éolienne de l'Est-du-Québec a d'abord été réalisé, le secteur emploie plus de 1200 personnes dans la région désignée qui regroupe la Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine et la MRC de la Matanie (TechnoCentre éolien, 2018). En date du 16 novembre 2017, il y avait une capacité de 2024,5 MW d'installée sur le territoire (TechnoCentre éolien, 2018). Cette puissance permet d'estimer qu'il faudra gérer 20 245 tonnes de pales dans un horizon de 20 à 25 ans.

Une présentation de la pensée cycle de vie et de la méthodologie est ensuite présentée. Pour situer la problématique, la revue de littérature d'ACV antérieures a permis de montrer que les pales ne sont pas la composante avec le plus d'impact pour une éolienne complète (CIRAIG, 2013 ; Guezuraga et al., 2012). Par contre, la gestion des pales représente la plus grande incertitude concernant la fin de vie de ces équipements (Andersen et al., 2007).

Par la suite, un état des connaissances a permis de recenser les principales techniques de traitement. Les pales actuellement en service dans la région désignée sont composées en majorité de fibre de verre. Cela complique la valorisation en comparaison à d'autres matières, comme la fibre de carbone. La fibre de verre ne possède virtuellement aucune valeur commerciale en raison de la perte de propriétés mécaniques importantes qu'entraînent les procédés de traitement et d'une valeur calorifique sous les standards industriels de récupération d'énergie (Wind Europe, 2017). Des projets ponctuels de réemploi existent, comme pour du mobilier urbain, mais la capacité de ces méthodes à détourner un volume important du dépotoir est limitée. En 2018, les pales qui doivent être démontées sont envoyées directement au LET le plus près.

L'objectif principal de ce projet de fin d'études était d'évaluer les bénéfices environnementaux en lien avec la valorisation des pales d'éoliennes dans une démarche d'économie circulaire dans l'Est-du-Québec. L'atteinte de trois objectifs spécifiques a permis de répondre à cet objectif principal. La performance environnementale de différents scénarios de traitement en fin de vie des pales d'éoliennes a été évaluée à l'aide d'une ACV comparative. Pour ce faire, trois scénarios ont été élaborés. Le premier est l'enfouissement, qui permet la comparaison avec la façon de faire actuelle. Le deuxième est la valorisation dans le béton, sous la forme d'un agrégat fin qui vient substituer le sable. Le troisième est l'incinération en cimenterie. En utilisant les pales comme carburant alternatif dans le four de pré-chauffage, il est possible de remplacer une partie du charbon utilisé actuellement. L'évaluation a été réalisée avec le logiciel SimaPro (Version Faculty 8.5.0.0) et la méthode IMPACT 2002+. Cette dernière effectue un calcul à deux niveaux à partir de quinze indicateurs intermédiaires qui sont obtenus depuis les flux de l'ICV. Ces indicateurs sont ensuite agrégés ensemble pour produire des catégories de dommages potentiels sur l'environnement.

Les résultats démontrent que le scénario de valorisation dans le béton est le plus bénéfique au niveau des catégories de dommages de la santé humaine et des changements climatiques. L'incinération en cimenterie limite le mieux l'épuisement des ressources. Il n'a pas été possible de conclure sur la qualité des écosystèmes en raison des performances équivalentes des scénarios.

Une analyse de sensibilité a permis d'établir que les distances de transport sont un paramètre clé de l'étude. De cette manière, il a été possible de calculer que la distance maximale de transport entre le moment du démontage au parc éolien et la deuxième vie du produit pour enregistrer un bénéfice au niveau des changements climatiques par rapport à l'enfouissement. Elle est de 1696 km pour la valorisation dans le béton et de 906 km pour l'incinération en cimenterie. Les scénarios peuvent inclure plus d'un transport par camion. Ainsi, il est possible d'atteindre la distance limite dans le cas de l'incinération dans la pratique. Pour le scénario de la valorisation dans le béton, la marge de manœuvre est plus confortable.

Les prochaines années pourraient apporter des avancées technologiques dans le domaine du recyclage de la fibre de verre qui ne sont pas évaluées dans cette étude. Selon les résultats, il est recommandé de favoriser les méthodes de traitement en fin de vie avec le moins d'étapes possibles et qui substituent une matière avec un impact environnemental élevé. De ce fait, le scénario de valorisation dans le béton serait encore plus performant si le produit substitué était du ciment plutôt que du sable. Toutefois, c'est tout de même celui qui présente la meilleure performance environnementale sur le plus d'indicateurs. C'est donc le scénario qui est recommandé dans le but de gérer 20 245 tonnes métriques de pales d'éoliennes en fin de vie dans la région désignée (Gaspésie et MRC de la Matanie) en 2018.

Dans le futur, les techniques de recyclage devront devenir plus économiquement viables en valorisant le plus possible les produits des procédés. Néanmoins, il serait intéressant d'investiguer davantage sur les applications de réemploi pour répondre à des problématiques régionales, par exemple la protection des berges.

## RÉFÉRENCES

- Akesson, D., Foltynowicz, Z., Christeen J. et Skrifvars, M. (2012). Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(17), 1136-1142.
- Albers, H., Greiner, S., Seifert, H. et Kühne, U. (2009). Recycling of wind turbine rotor blades – Fact or fiction? *Dewi Mag*, 34(1). 32-41.
- Andersen, N. (2015). *Wind turbine end-of-life: Characterisation of waste material*. (Mémoire de maîtrise, Université de Gävle, Gävle, Suède). Repéré à <http://beta.diva-portal.org/smash/get/diva2:873368/FULLTEXT01.pdf>
- Andersen, P. D., Borup, M. et Krogh, T. (2007). Managing long-term environmental aspects of wind turbines: A prospective case study. *International Journal of Technology, Policy and Management*, 7(4), 339-354.
- Asokan, P., Osmani, M., Price, A. D. F. (2009). Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete and cement composites. *Journal of Cleaner Production*, 17(9). 821-829.
- Association canadienne de normalisation (CSA). (2018). Élaboration des normes. Repéré à <https://www.csagroup.org/fr/codes-normes/elaboration-des-normes/>
- Beauson, J. et Brøndsted, P. (2016). *Wind turbine blades: An end of life perspective*. Repéré à [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-39095-6\\_23.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-39095-6_23.pdf)
- Bernatchez, P., Dugas, S., Fraser, C., Da Silva, L. (2015). *Évaluation économique des impacts potentiels de l'érosion des côtes du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques* (Rapport de recherche). Repéré à [https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportBernatchez2015\\_FR.pdf](https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportBernatchez2015_FR.pdf)
- Bureau de normalisation du Québec. (2011). Fiche terminologique « Développement durable ». Repéré à [http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=26540755](http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26540755)
- Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTEI). (2018). Repéré à <http://www.cttei.com/>
- Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG). (2013). *Analyse du cycle de vie de filières de production décentralisée d'énergie électrique à petite échelle* (Rapport technique préparé pour Hydro-Québec). Repéré à <http://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/ACV-filieres-energie-electrique-rapport-complet.pdf>
- Commission européenne. (2008). Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive). Repéré à <http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/>
- Confédération générale des petites et moyennes entreprises (CGPME). (2014). *Guide pratique de l'éco-conception : vers de nouveaux modèles économiques*. Repéré à <https://bourgogne-franche-comte.ademe.fr/sites/default/files/cgpme-guide-eco-conception-ld.pdf>
- Correia, J., Almeida, N., Figueira, J. (2011). Recycling of FRP composites: Reusing fine GFRP waste in concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 19(15), 1745-1753.

- Dallaire, M. (2013). *Le béton et la poudre de verre comme ajout cimentaire : un choix logique pour Équiterre et la Maison du développement durable*. Repéré à [http://www.rediscoverconcrete.ca/assets/files/sustainability/V9N3\\_Dossier-b %C3 %A9ton.pdf](http://www.rediscoverconcrete.ca/assets/files/sustainability/V9N3_Dossier-b %C3 %A9ton.pdf)
- D'Souza, N., Erhi, G. et Shonfiled, P. (2011). *Life cycle assesment of electricity production from a V112 turbine wind plant*. Repéré à [https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca\\_v112\\_study\\_report\\_2011.pdf](https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca_v112_study_report_2011.pdf)
- Ecoinvent Association. (2017). Ecoinvent version 3.4. Repéré à <https://www.ecoinvent.org/>
- European Wind Energy Association (EWEA). (2009). *The economics of wind energy*. Repéré à [http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/reports/Economics\\_of\\_Wind\\_Main\\_Report\\_FINAL-lr.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/reports/Economics_of_Wind_Main_Report_FINAL-lr.pdf)
- Feih, S., Boiocchi, E., Mathys, G., Mathys, Z., Gibson, A.G. et Mouritz, A.P. (2011). Mechanical properties of thermally-treated and recycled glass fibres. *Composites Part B : Engineering*, 42(3). 350-358.
- Giroux Environmental Consulting. (2014). *State of waste management in Canada* (Rapport préparé pour le Conseil canadien des ministres de l'environnement). Repéré à [https://www.ccme.ca/files/Resources/waste/wst\\_mgmt/State\\_Waste\\_Mgmt\\_in\\_Canada%20April%202015%20revised.pdf](https://www.ccme.ca/files/Resources/waste/wst_mgmt/State_Waste_Mgmt_in_Canada%20April%202015%20revised.pdf)
- Global Wind Energy Council (GWEC). (2014). *Global wind 2013 report : Market forecast for 2014-2018*. Repéré à <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/Market-forecast-2014-2018.pdf>
- Google. (2013). Repéré à [https://www.google.ca/maps/@49.0513159,-66.829185,3a,75y,54.04h,86.22t/data=!3m6!1e1!3m4!1sO7WpG\\_nevuBqVdPQtI6KaA!2e0!7i13312!8i6656](https://www.google.ca/maps/@49.0513159,-66.829185,3a,75y,54.04h,86.22t/data=!3m6!1e1!3m4!1sO7WpG_nevuBqVdPQtI6KaA!2e0!7i13312!8i6656)
- Guezuraga, B., Zauner, R. et Pölz, W. (2012). Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. *Renewable Energy* 37(1), 37-44.
- Idir, R., Cyr, M., Tagnit-Hamou, A. (2010). Peut-on valoriser massivement le verre dans les bétons ? *Verre*, 16(5). 70-77.
- Institut de la statistique du Québec. (2018). Taux de chômage, régions administratives, régions métropolitaines de recensement et ensemble du Québec, 2007-2017. Repéré à [http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/travail-remuneration/population-active-chomage/ra-rmr/taux\\_chomage\\_reg.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/travail-remuneration/population-active-chomage/ra-rmr/taux_chomage_reg.htm)
- Institut de l'environnement, du développement durable et de l'économie circulaire (Institut EDDEC). (2018). Économie circulaire. Repéré à <http://instituteddec.org/themes/economie-circulaire/>
- Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P. et Shaked, S. (2010). *Analyse du cycle de vie. Comprendre et réaliser un écobilan*. (2e éd.) Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Larsen, H. H. et Sønderberg Petersen, L. (2014). *Wind energy: Drivers and barriers for higher shares of wind in the global power generation mix*. Repéré à [http://orbit.dtu.dk/files/102457047/DTU\\_INTL\\_ENERGY\\_REP\\_2014\\_WIND.pdf](http://orbit.dtu.dk/files/102457047/DTU_INTL_ENERGY_REP_2014_WIND.pdf)



- Léger. (2017). *Sondage sur la perception des Québécois à l'égard de l'énergie éolienne* (Rapport préparé pour CanWEA). Repéré à <https://canwea.ca/wp-content/uploads/2017/09/sondage-sur-la-perception-des-Quebecois-a-legard-de-lenergie-eolienne.pdf>
- Liu, P. et Barlow, C. Y. (2017). Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management*, 62(1), 229-240.
- Lupien, C. (2006). *Projet pilote de valorisation du verre récupéré dans la construction de chaussées* (Rapport préparé pour RECYC-QUÉBEC). Repéré à [http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/upload/publications/MICI/ProjetP\\_ValoVerre.pdf](http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/upload/publications/MICI/ProjetP_ValoVerre.pdf)
- Mativenga, P., Shuaib, N., Howarth, J., Pestalozzi, F. et Woidasky, J. (2016). High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 65(1). 45-48.
- Martinez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jiménez, E. et Blanco, J. (2009) Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(1). 52-63.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2016). *Lieux d'enfouissement technique autorisés et en exploitation*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/matieres/reglement/LET-autorise-exploitation.pdf>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). (2016). *Politique énergétique 2030*. Repéré à <https://politiqueenergetique.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/politique-energetique-2030.pdf>
- Mishnaevsky, L., Jr., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M. et Sørensen, B.F. (2017). Materials for wind turbine blades: An overview. *Materials*, 10(11), 1285.
- Morin, C., Loppinet-Serani, A., Cansell, F. et Aymonier, C. (2012). Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: State of the art. *The Journal of Supercritical Fluids*, 66(0). 232–240.
- Oliveira, V. A. (2018, mai). *Recyclage de composite à base de fibre de carbone : une nouvelle voie développée par Extractive*. Communication présentée à l'atelier de recyclage des composites du CTTÉI, Sorel-Tracy, Québec.
- Organisation internationale de normalisation (ISO). (2006a). *Management environnemental : analyse du cycle de vie : principes et cadre*. Norme internationale ISO 14040. Genève, Suisse : auteur
- Organisation internationale de normalisation (ISO). (2006b). *Management environnemental : analyse du cycle de vie : exigences et lignes directrices*. Norme internationale ISO 14044. Genève, Suisse : auteur
- Pickering, S. J. (2006). Recycling technologies for thermoset composite materials—current status. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 37(8), 1203-1215.
- Portland Cement Association (PCA). (2013). Données de la masse volumique. Repéré à [http://www.cement.org/tech/faq\\_unit\\_weights.asp](http://www.cement.org/tech/faq_unit_weights.asp)
- Quantis. (2015). *Analyse environnementale du cycle de vie de projets de commercialisation du verre mixte récupéré via des centres de tri de matières recyclables au Québec* (Rapport préparé pour RECYC-QUÉBEC). Repéré à <https://www.recyc->

- quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/acv-projet-commercialisation-verre-recupere-rapport-complet.pdf
- Rahnama, B. (2011). *Reduction of environmental impact effect of disposing wind turbine blades*. (Mémoire de maîtrise, Université de Gotland, Gotland, Suède). Repéré à <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:691565/FULLTEXT01.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2018). L'économie circulaire, une priorité. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/entreprises-organismes/mieux-gerer/economie-circulaire#schma-de-leconomie-circulaire>
- Sayer, F., Bürkner, F. Blunk, M., van Wingerde, A. M., Busmann, H.-G. et Seifert, H. (2009). Influence of loads and environmental conditions on material properties over the service life of rotor blades. *DEWI Mag*, 32(1), 24-31.
- Schmidl, E. (s. d.). *Recycling of fibre – Reinforced plastics using the example of rotor blades*. Repéré à [https://www.iswa.org/uploads/tx\\_iswaknowledgebase/Schmidl.pdf](https://www.iswa.org/uploads/tx_iswaknowledgebase/Schmidl.pdf)
- SECOR-KPMG. (2013). *Retombées économiques de l'industrie éolienne québécoise*. Repéré à [https://canwea.ca/wp-content/uploads/2015/03/Secor-KPMG\\_Retomb%C3%A9es-%C3%A9olien.pdf](https://canwea.ca/wp-content/uploads/2015/03/Secor-KPMG_Retomb%C3%A9es-%C3%A9olien.pdf)
- Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ). 2018. Permis spécial de circulation. Repéré à <https://saaq.gouv.qc.ca/transport-biens/permis-special-circulation/classe-1-transport-hors-dimensions-en-largeur-en-hauteur-en-longueur-ou-pour-des-excedents-avant-ou-arriere/mobile/page/>
- Sørensen, B. F., Jørgensen, E., Debel, C. P., Jensen, F. M., Jensen, H. M., Jacobsen, T. K., Halling, K. M. (2004). *Improved design of large wind turbine blade of fibre composites based on studies of scale effects*. Repéré à [http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:90493/datastreams/file\\_7702048/content](http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:90493/datastreams/file_7702048/content)
- Tagnit-Hamou, A. et Bengougam, T. (2012). The Use of Glass Powder as Supplementary Cementitious Material: Field trials in slab, wall, and sidewalk concrete mixtures. *Concrete International* 34 (3), 56- 61.
- TechnoCentre éolien. (2018). Repéré à <http://eolien.qc.ca/>
- Thomasson, J. L., Yang L. et Meier, R. (2014). The properties of glass fibres after conditioning at composite recycling temperatures. *Composites: Part A*, 61(1). 201–208.
- Topcu, I. et Canbaz, M. (2004). Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*, 34(2). 267-274.
- Vestas Wind Systems A/S. (2006). *Life cycle assessment of offshore and onshore sited wind power plants based on Vestas V90-3.0 MW turbines*. Repéré à [https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca\\_v90\\_june\\_2006.ashx](https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca_v90_june_2006.ashx)
- Ville de Matane. (2018). Lieu d'enfouissement technique et écocentre. Repéré à <http://www.environnementmatane.ca/environnement/matieres-residuelles/ecocentre-let.html>
- Wind Europe. (2017). *Discussion paper on managing composite blade waste*. Repéré à <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/policy/topics/sustainability/Discussion-paper-on-blade-waste-treatment-20170418.pdf>

Yang, Y., Boom, R., Irion, B., van Heerden, D.-J., Kuiper, P. et de Wit, H. (2012). Recycling of composite materials. *Chemical Engineering and Processing*. 51(1). 53-68.

## BIBLIOGRAPHIE

- Chaire de gestion du secteur de l'énergie (2017). *État de l'énergie au Québec 2018*. Repéré à [http://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2017/12/EEQ2018\\_WEB-FINAL.pdf](http://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2017/12/EEQ2018_WEB-FINAL.pdf)
- Cloutier, J. (2015). *Est-ce que le stockage d'énergie au Québec pourrait être avantageux d'un point de vue environnemental ?* (Essai de maîtrise). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec. Repéré à <http://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/7696>
- Composites UK. (2016). *Composites recycling: Where are we now?* Repéré à <https://compositesuk.co.uk/system/files/documents/Recycling%20Report%202016.pdf>
- Ellen MacArthur Foundation (2015). *Potential for Denmark as a Circular Economy*. Repéré à [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/20151113\\_DenmarkCaseStudy\\_FINALv02.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/20151113_DenmarkCaseStudy_FINALv02.pdf)
- Ortegon, K., Nies, L. F. et Sutherland, J. W. (2013). Preparing for end of service life of wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 39(1). 191-199
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). (2017). *Renewables 2017 – Global Status Report*. Repéré à [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399\\_GSR\\_2017\\_Full\\_Report\\_0621\\_Opt.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf)
- Rochon, M. (2013). *Analyse du cycle de vie comparative du bâtiment résidentiel* (Essai de maîtrise). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec. Repéré à <http://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/7435>

## ANNEXE 1 — LISTE DES PARCS ÉOLIENS EN SERVICE AU QUÉBEC

**Tableau A.1 Parcs éoliens en service en date du 16 novembre 2017** (tiré de : TechnoCentre éolien, 2018)

Année	Nom du parc/Emplacement	MW	Turbines	Promoteur
2016	Roncevaux (Gaspésie)	74,8	GE 2,2 MW	Régie intermunicipale de l'énergie Gaspésies-Îles-de-la-Madeleine, Énergie éolienne Bas-Saint-Laurent
2016	Mesgi'g Ugju's'n (TNO Rivière-Nouvelle, Gaspésie)	149,25	Senvion 3,2 MW	Mi'gmawei Mawiomi Société d'affaires (MMSA) et Innergex énergie renouvelable Inc.
2016	Pierre-de-Saurel (MRC Pierre-De-Saurel)	24,6	Senvion 2,05 MW	MRC Pierre-de-Saurel
2015	Frampton (Municipalité de Frampton)	24	ENERCON 2 MW	Municipalité de Frampton et Boralex
2015	Mont-Rothery (MRC de La Côté-de-Gaspé et MRC de La HauteGaspésie)	74	Senvion 2,05 MW	EDF Énergies Nouvelles Canada
2015	Côte-de-Beaupré (TNO Lac Jacques-Cartier)	23,5	ENERCON 2,35 MW	MRC de La Côte-de-Beaupré et Boralex
2015	Rivière du Moulin — phase 2 (TNO du Lac Pikauba, TNO du Lac Minustuk)	200	Senvion 2,05 MW	EDF Énergies Nouvelles Canada et DIM WIND LP
2015	Témiscouata II (Saint-Honoré-de-Témiscouata, Saint-Elzéar-deTémiscouata)	51,7	ENERCON 2,35 MW	Boralex
2015	Saint-Philémon (MRC de Bellechasse et Saint-Philémon)	24	ENERCON 3 MW	Parc éolien St-Philémon S.E.C.

**Tableau A.1 Parcs éoliens en service en date du 16 novembre 2017** (tiré de : TechnoCentre éolien, 2018) (suite)

2014	Des Moulins 2 (TNO Ruisseau Ferguson, Gaspésie)	21,15	ENERCON 2,35 MW	Invenergy Wind Canada LLC
2014	Le Plateau 2 (TNO Ruisseau Ferguson, Gaspésie)	21,15	ENERCON 2,35 MW	Régie intermunicipale de l'énergie Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine et Invenergy Wind Canada ULC
2014	Vent du Kempt (Sainte-Marguerite, Causapsal, Ste-Florence)	101,05	ENERCON 2,35 MW	Éolelectric
2014	Saint-Damase (Municipalité de Saint-Damase)	23,5	ENERCON 2,35 MW	Corporation Fleur de Lis Éoliennes Saint-Damase Commandité et Algonquin Power
2014	Seigneurie de Beaupré # 4 (TNO du Lac Jacques-Cartier)	67,9	ENERCON 2,3 MW & 3 MW	Boralex Inc., Gaz Métro et Valener
2014	Témiscouata (MRC de Témiscouata)	23,5	ENERCON 2,35 MW	Éoliennes Témiscouata SEC et Boralex
2014	Rivière du Moulin — phase 1 (TNO du Lac Pikauba, TNO du Lac Minustuk)	150	Senvion 2,05 MW	EDF Énergies Nouvelles Canada et DIM WIND LP
2014	Le Granit (MRC du Granit)	24,6	Senvion 2,05 MW	Énergie du Granit (regroupement de municipalités de la MRC du Granit) et EDF Énergies Nouvelles Canada
2014	Mine Raglan	3	ENERCON 3 MW	Glencore
2014	La Mitis (MRC de La Mitis)	24,6	Senvion 2,05 MW	MRC de la Mitis et EDF Énergies Nouvelles Canada

**Tableau A.1 Parcs éoliens en service en date du 16 novembre 2017** (tiré de : TechnoCentre éolien, 2018) (suite)

2013	Seigneurie de Beupré # 3 (TNO du Lac Jacques-Cartier)	140,6	ENERCON 2 MW & 2,3 MW	Boralex, Gaz Métro et Valener
2013	Des Moulins (Kinnear's Mills, StJean-de-Bréboeuf, Thetford Mines)	135,7	ENERCON 2,31 MW	Invenergy Wind Canada LLC
2013	Seigneurie de Beupré # 2 (TNO du Lac Jacques-Cartier)	131,2	ENERCON 2 MW & 2,3 MW	Boralex, Gaz Métro et Valener
2013	Viger-Denonville (MRC de Rivière-du-Loup)	24,6	Senvion 2,05 MW	MRC de Rivière-du-Loup et Innergex Énergie renouvelable inc.
2013	De l'Érable (Sainte-Sophie d'Halifax, St-Ferdinand, St- Pierre-Baptiste)	100	ENERCON 2 MW	Enerfin Energy Company of Canada Inc.
2013	Lac Alfred — phase 2	150	Senvion 2,05 MW	EDF Énergies Nouvelles Canada et Enbridge
2013	New Richmond	67,8	ENERCON 2,31 MW	Venterre NRG Inc. (TransAlta)
2013	Massif du Sud	150	Senvion 2,05 MW	EDF Énergies Nouvelles Canada et Enbridge
2013	Lac Alfred — phase 1	150	Senvion 2,05 MW	EDF Énergies Nouvelles Canada et Enbridge
2013	Montréal	101,2	ENERCON 2,31 MW	Kruger Énergie Inc.

**Tableau A.1 Parcs éoliens en service en date du 16 novembre 2017** (tiré de : TechnoCentre éolien, 2018) (suite)

2012	Gros-Morne — phase 2	111	GE 1,5 MW	Cartier Énergie Éolienne
2012	Saint-Robert-Bellarmin	80	Senvion 2,05 MW	EDF Énergies Nouvelles Canada et Enbridge
2012	Le Plateau (TNO Ruisseau Ferguson, Gaspésie)	138,6	ENERCON 2,31 MW	Invenergy Wind Canada LLC
2011	Gros-Morne — phase 1	100,5	GE 1,5 MW	Cartier Énergie Éolienne
2011	Montagne Sèche	58,5	GE 1,5 MW	Cartier Énergie Éolienne
2011	Mont-Louis	100,5	GE 1,5 MW	Northland Power
2010	Parc Éolien du Renard	4,1	Senvion 2,05 MW	TechnoCentre éolien
2009	St-Ulric/St-Léandre	127,5	GE 1,5 MW	Northland Power
2008	Carleton	109,5	GE 1,5 MW	Cartier Énergie Éolienne
2007	Anse-à-Valleau	100,5	GE 1,5 MW	Cartier Énergie Éolienne



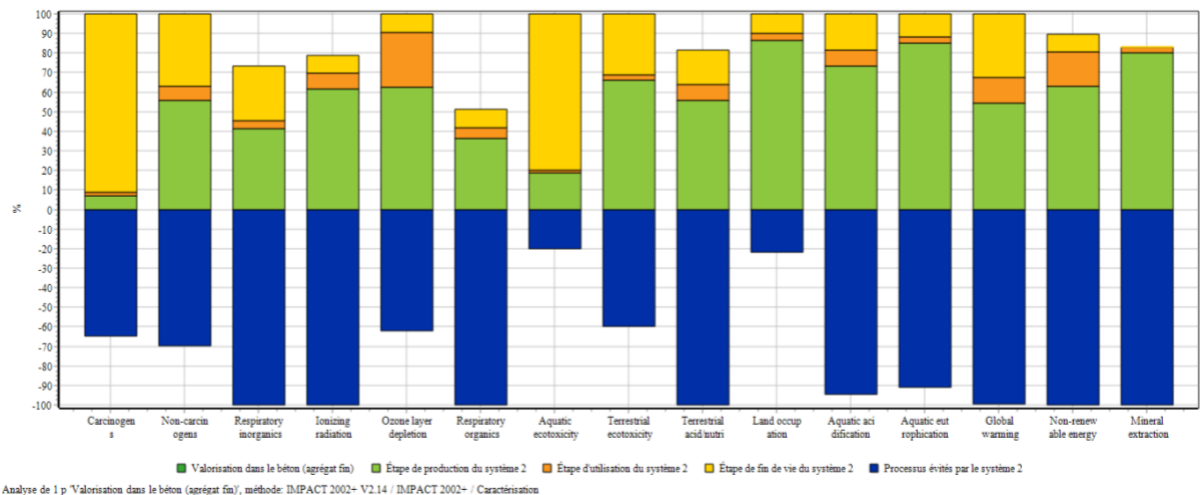
**Tableau A.1 Parcs éoliens en service en date du 16 novembre 2017** (tiré de : TechnoCentre éolien, 2018) (suite)

2006	Baie-des-Sables	109,5	GE 1,5 MW	Cartier Énergie Éolienne
2005	Mont Miller (Murdochville)	54	Vestas 1,8 MW	NextEra Energie Canada
2004	Mont Copper (Murdochville)	54	Vestas 1,8 MW	NextEra Energie Canada
1999	Matane	42	NEG Micon 750 kW	TransAlta
1999	Cap-Chat	57	NEG Micon 750 kW	TransAlta
<b>TOTAL</b>		<b>3504,6</b>	<b>MW</b>	

ANNEXE 2 — ANALYSE DE CONTRIBUTION

Scénario 2 : Valorisation dans le béton

Catégories d'impacts intermédiaires

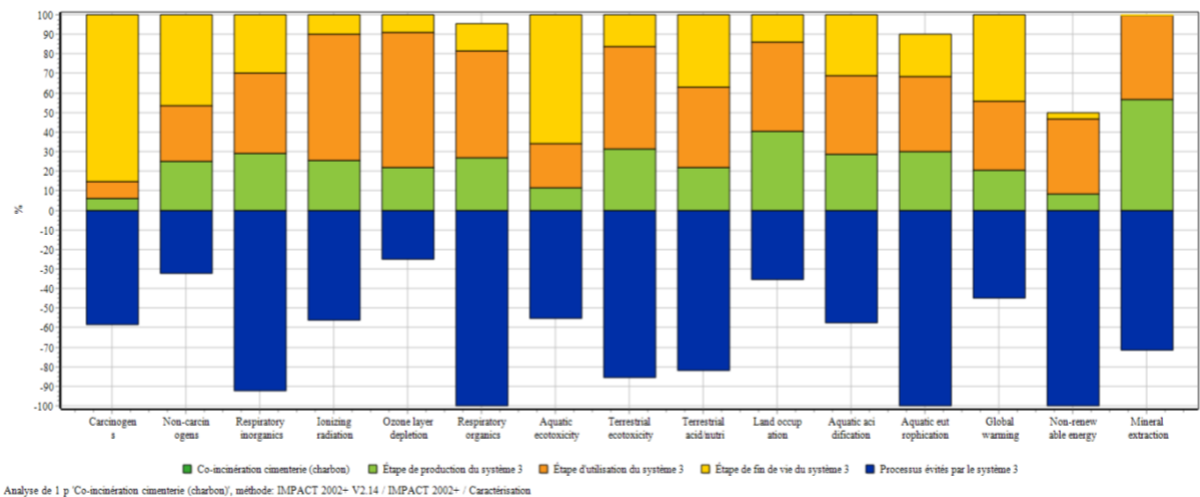


Contribution des processus évités

Catégorie de dommages	Étape du cycle de vie	Processus	Substances
Santé humaine	Processus évités	Coke	PM <sub>2.5</sub>
Qualité des écosystèmes		Ferrochromium	
Changement climatique		Blasting	Aluminium (air)
Ressources		Pig iron	Carbon dioxide (fossil)
		Hard coal	Coal, hard

Scénario 3 : Incinération en cimenterie

Catégories d'impacts intermédiaires

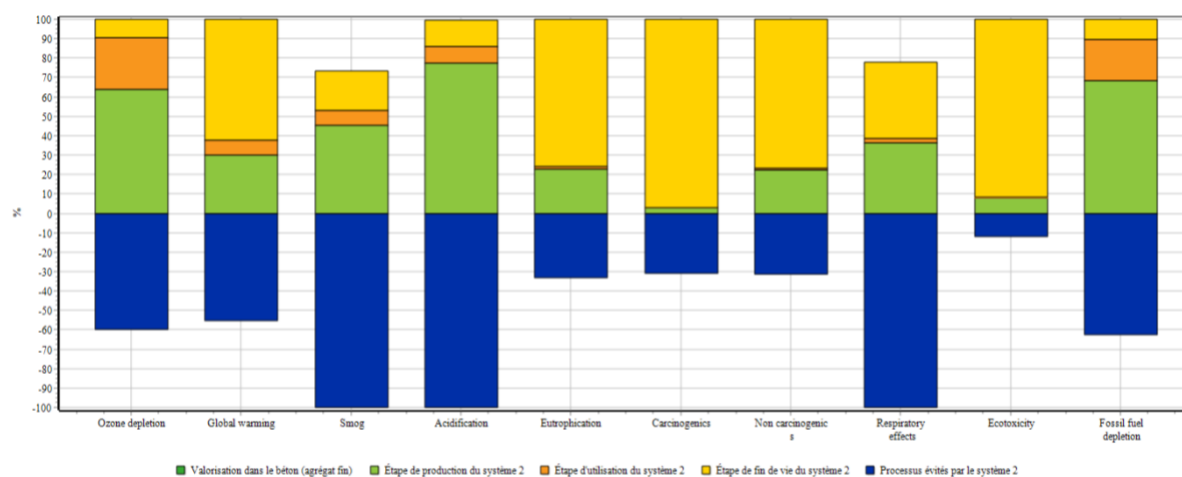


## Contribution des processus évités

Catégorie de dommages	Étape du cycle de vie	Processus	Substances
Santé humaine	Processus évités	Coke Ferrochromium	PM <sub>2.5</sub>
Qualité des écosystèmes		Blasting	Aluminium (air)
Changement climatique		Pig iron	Carbon dioxide (to soil or biomass stock)
Ressources		Hard coal	Coal, hard

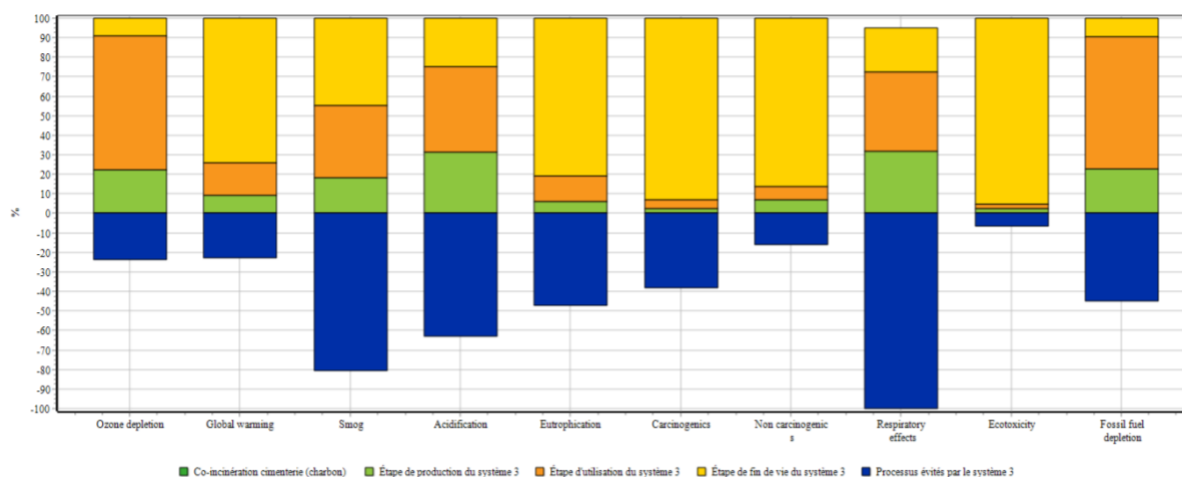
## ANNEXE 3 — ANALYSE DE SENSIBILITÉ SELON LA MÉTHODE TRACI

### Scénario 2 : Valorisation dans le béton



Analyse de 1 p 'Valorisation dans le béton (agréat fin)', méthode: TRACI 2.1 V1.04 / Canada 2005 / Caractérisation

### Scénario 3 : Incinération en cimenterie



Analyse de 1 p 'Co-incinération cimenterie (charbon)', méthode: TRACI 2.1 V1.04 / Canada 2005 / Caractérisation